

**Міністерство освіти і науки України  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
Херсонська філія**

**Енерготехнічний факультет**

**Кафедра автоматики та електроустаткування**

**Рекомендовано до захисту**  
Завідувач кафедри автоматики та  
електроустаткування  
\_\_\_\_\_ Михальченко П.Є.  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Удосконалення обладнання водолазного комплексу на основі  
спеціального виконання електродвигуна системи обробки дихально-газової  
суміші»

Виконав: здобувач VI курсу, групи 6367зм  
за спеціальністю: 141 "Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка"

(шифр і назва спеціальності)

Освітньо-професійна програма:  
«Експлуатація суднових автоматизованих  
систем»

(назва)

Горбачов М.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Ставинський Р.А.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Шарейко Д.Ю.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

м. Херсон – 2020 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова  
Херсонська філія

Інститут, факультет Енерготехнічний

Кафедра Автоматики та електроустаткування

Освітньо-кваліфікаційний рівень другий (магістерський)

Галузь знань 14 "Електрична інженерія"

(шифр і назва)

Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма "Експлуатація суднових автоматизованих систем"

(назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри автоматики та  
електроустаткування**

“ \_\_\_\_\_ ” Михальченко П.Є.  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

**Горбачов Максим Васильович**

1. Тема роботи: Удосконалення обладнання водолазного комплексу на основі спеціального виконання електродвигуна системи обробки дихально-газової суміші.

Науковий керівник: к.т.н., доцент Ставинський Р.А.

Затверджена наказом ХФНУК від \_\_\_\_\_ року № \_\_\_\_.

2. Строк подання студентом роботи:

3. Об'єкт дослідження: електродвигун потужністю  $P_n = 250/140$ Вт; кількість фаз  $m = 3$ , синхронна частота обертання:  $n_1 = 3000/1500$  об/хв; частота струму мережі:  $f = 50$  Гц; номінальна напруга:  $U_1 = 27$  В.

4. Предмет дослідження: показники технічного рівня варіантів електродвигунів з традиційною і перетвореною структурою активної частини.

5. Зміст пояснювальної записки (перелік задач, які потрібно вирішити):

5.1. Особливості обладнання барокамери і підводної спускової камери водолазного комплексу.

5.2. Удосконалення нагнетувачів системи обробки дихально-газової суміші.

5.3. Розрахунок спеціального двигуна системи обробки дихально-газової суміші.

5.4. Охорона праці.

5.5. Охорона навколишнього середовища.

Перелік графічного матеріалу:

1. Головні складові частини водолазного комплексу.
2. Склад силового електрообладнання підводної спускової камери.
3. Схема підключень обладнання спускової підводної камери
4. Варіанти конструктивних схем агрегату обробки повітря.
5. Принципова схема уніфікованого електрообладнання агрегатів комплексної обробки дихально-газової суміші.
6. Схема двохшвидкісної обмотки з можливістю переключення у відношенні  $p_1/p_2 = 1/2$ .
7. Конструктивні схеми торцевих асинхронних двигунів.
8. Торцевий асинхронний двигун.

Дата видачі завдання: \_\_.\_\_.20\_\_ р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**  
**виконання випускної роботи**

Найменування розділів	Строк виконання	Відмітка про виконання
1. Особливості обладнання барокамери і підводної спускової камери водолазного комплексу.		
2. Удосконалення нагнетувачів системи обробки дихально-газової суміші.		
3. Розрахунок спеціального двигуна системи обробки дихально-газової суміші.		
4. Охорона праці.		
5. Охорона навколишнього середовища.		

Здобувач \_\_\_\_\_ Горбачов М.В.  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Ставинський Р.А.  
(підпис)

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
Розділ 1. ОСОБЛИВОСТІ ОБЛАДНАННЯ БАРОКАМЕРИ І ПІДВОДНОЇ СПУСКОВОЇ КАМЕРИ ВОДОЛАЗНОГО КОМПЛЕКСУ .....	8
1.1. Призначення та особливості обладнання системи забезпечення занурення .....	8
.....	13
1.2. Склад обладнання робочих камер .....	
1.3. Удосконалення конструктивних і схемотехнічних рішень обладнання камер ГВК на основі електродвигуна спеціальної конструкції .....	16
.....	21
1.4. Висновки до розділу 1 .....	
Розділ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ НАГНЕТУВАЧІВ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ДИХАЛЬНО-ГАЗОВОЇ СУМІШІ .....	22
2.1. Аналіз варіантів конструкцій асинхронних двигунів для приводу вентиляторів .....	22
.....	27
2.2. Конструкції елементів корпусу і підшипникових вузлів торцевих асинхронних .....	33
.....	38
2.3. Технічні рішення двополюсного асинхронного двигуна малої потужності .....	39
.....	
2.4. Висновки до розділу 2 .....	39
Розділ 3. РОЗРАХУНОК СПЕЦІАЛЬНОГО ДВИГУНА СИСТЕМИ ОБРОБКИ ДИХАЛЬНО-ГАЗОВОЇ СУМІШІ .....	48
.....	51
.....	57
3.1. Визначення головних розмірів та геометричних співвідношень активної частини .....	61
.....	61
3.2. Розрахунок магнітного кола та втрат неробочого руху .....	65

3.3. Розрахунок параметрів і характеристик .....	66
3.4. Методика розрахунку робочих характеристик .....	70
Розділ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....	71
4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів в машинному відділенні судна .....	74
4.2. Розрахунок освітленості машинного відділення .....	77
4.3. Методи усунення небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	
Розділ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	
5.1. Негативний вплив судів на навколишнє середовище .....	
5.2. Заходи щодо захисту навколишнього середовища .....	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	

## ВСТУП

Діяльність людини на морі в теперішній час все більш характеризується виконанням робіт під водою. Зростаючі потреби в енергетичній, харчовій і мінеральній сировині змушує багато промислових країн форсувати розвідку нафти і газу на власних шельфах і в океанічних глибинах, а також створювати нові зразки дослідницької техніки і промислового устаткування для видобутку в морі мінеральної сировини і білкових продуктів. При цьому ведеться інтенсивне будівництво підводних апаратів і морських бурових платформ, створюється підводна землерийна техніка для видобутку твердих корисних копалин.

Практичне освоєння мінеральних і харчових ресурсів морів і океанів привело до розробки і серійного виготовлення нових зразків підводних апаратів, зокрема для доставки водолазів до місця роботи.

Англійською фірмою «Винкерс» була побудована двохвідсікова камера для водолазів-ремонтників до нафтопромислів у Північному морі на глибину до 366 м. Автономність апарата розрахована на 7 діб. Базою для такого апарата може служити не тільки надводне судно, але і підвідний човен.

Останнім часом багато фірм почали випускати так називані модульні підводні апарати, що збираються з окремих модулів (блоків). До складу блоків входять елементи міцного корпусу, енергетична установка, акумуляторні батареї, рушії, прилади і т.д. Наявність уніфікованих блоків дозволяє збирати з них потрібний для конкретних робіт підводний апарат: науково-дослідний, робочий, рятувальний, водолазний, туристичний і т.д.

Експлуатація апаратів, що транспортуються судном-базою, у найсильнішому ступені залежить від погоди. Як правило, при хвилюванні моря в 4-5 балів значно утрудняється спуск апарата і його підйом на палубу. У зв'язку з цим, для забезпечення підводних робіт у районах з важкими погодними умовами, будуються підводні човни, у тому числі з атомною енергетичною установкою. Човна мають ангар для розміщення декількох глибоководних апаратів. Такий комплекс дозволяє виконати будь-як підводні операції без впливля на поверхню, що значно підвищує ефективність підводних робіт. У 1986 році на шведській судноверфі «Кокуля» було побудовано підводне судно водотоннажністю 1600 т, здатне нести на борті глибоководний комплекс вагою 50 т. Очевидно таким підводним комплексом належить велике майбутнє при виконанні робіт на великих акваторіях шельфу.

Не менш інтенсивно створюється водолазне устаткування для видобутку біологічної сировини і продуктів. Підводне мореплавство на шельфах неможливо без відповідної механізації й автоматизації виробничих процесів по вирощуванню, збору й обробці морських рослин і розведенню тварин і риби. А для обслуговування господарських комплексів, що будуть створюватися у віддалених районах океану, будуть потрібні плавучі міста і заводи.

Прототипом системи, що розглядається у дипломній роботі, є комплекс занурення до 300 м на судні-носії "Аюдаг" (будувалось Миколаївським суднобудівним заводом "Імені 61 комунара" у началі 90-х років минулого віку та порізано, сумісно з обладнанням глибоководного водолазного комплексу, у зв'язку з розпадом Радянського Союзу, на металобрухт, при готовності 80%).

**Актуальність теми.** «Традиційними» способами рішення задач підвищення технічного рівня рухомих і статичних електричних машин є використання удосконалених електротехнічних матеріалів, методик оптимізаційних розрахунків та систем охолодження. Однак можливості подальшого розвитку електромеханічних пристроїв вказаними способами в рамках традиційних («класичних») структур і конструкцій електромагнітних систем (ЕМС) є обмеженими. Необхідні нові нетрадиційні підходи до удосконалення електричних машин на основі системного підходу, структурних перетворень і структурної оптимізації їх ЕМС. Удосконалення

обладнання морської техніки можливо на основі використання спеціальних електродвигунів з підвищеною конструктивною пристосованістю до конкретних механізмів, на основі нових нетрадиційних конструкторсько-технологічних рішень ЕМС.

На основі викладеного, пошук нових нетрадиційних конструкторсько-технологічних рішень ЕМС, що забезпечують зниження масогабаритних показників, а також підвищення компактності і надійності електродвигунів морського призначення, має особливу актуальність.

**Мета і задачі дослідження.** Робота направлена на вирішення питання можливості удосконалення обладнання водолазного комплексу на основі спеціального виконання електродвигуна системи обробки дихально-газової суміші.

Для досягнення поставленої мети в магістерській роботі визначені і вирішені такі задачі:

- аналіз обладнання барокамери і підводної спускової камери водолазного комплексу;
  - аналіз варіантів конструкцій асинхронних двигунів для приводу вентиляторів;
  - обґрунтування конструкторсько-технологічних рішень асинхронного двигуна спеціального виконання;
  - удосконалення конструктивних і схемотехнічних рішень обладнання камер водолазного комплексу;
  - розрахунок спеціального двигуна системи обробки дихально-газової суміші.
- Також в роботі розглянуті екологічні питання та питання охорони праці.

**Об'єкт дослідження** – трифазні асинхронні двигуни спеціального виконання.

**Предмет дослідження** – показники технічного варіантів ЕМС електродвигунів з традиційною і перетвореною структурою активних елементів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- визначено вплив заміни електродвигуна системи обробки дихально-газової суміші класичного циліндричного виконання на торцевий асинхронний двигун.



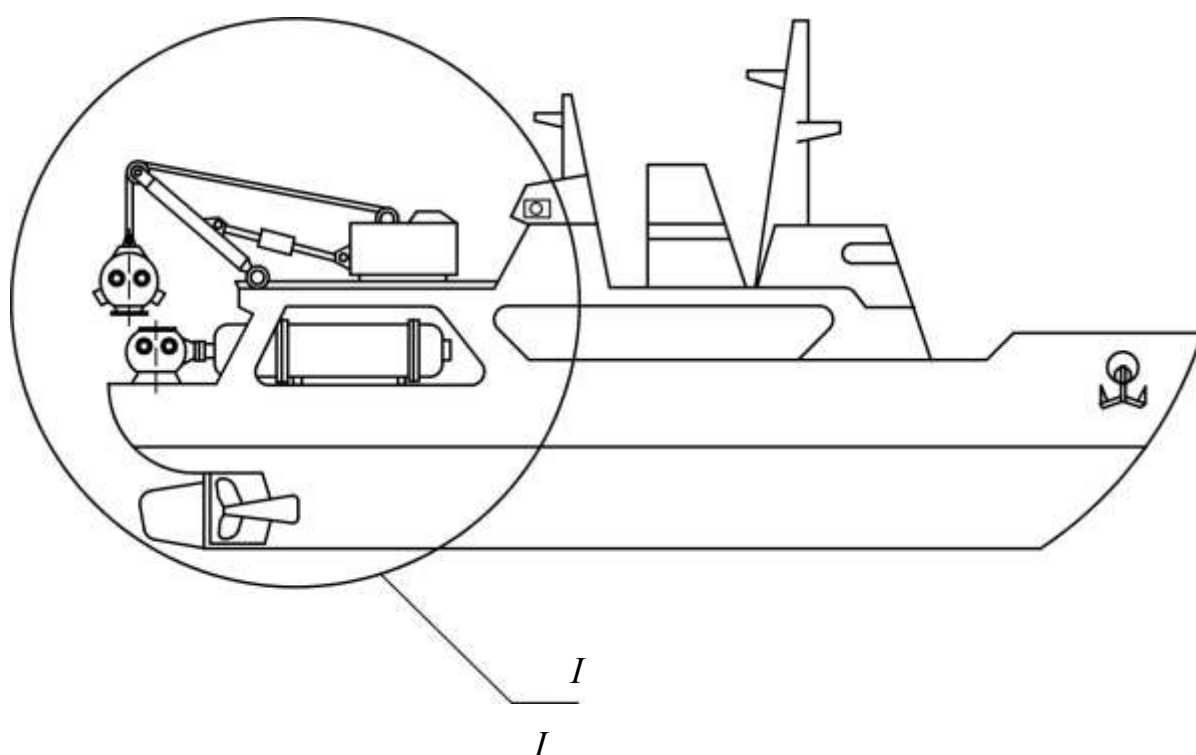
## **Розділ 1. ОСОБЛИВОСТІ ОБЛАДНАННЯ БАРОКАМЕРИ І ПІДВОДНОЇ СПУСКОВОЇ КАМЕРИ ВОДОЛАЗНОГО КОМПЛЕКСУ**

### **1.1. Призначення та особливості обладнання системи забезпечення занурення**

Глибоководні водолазні комплекси (ГВК) уявляють собою складні морські технічні системи забезпечення занурення акванавтів на глибини до 300...1000 м та базуються на науково-дослідних, рятувальних, або промислових судах-носіях. Прототипом системи, що розглядається у дипломному проекті, є комплекс занурення до 300 м на судні-носії "Аюдаг" (будувалось Миколаївським суднобудівним заводом "Імені 61 комунара" у началі 90-х років минулого віку та порізано, сумісно з обладнанням ГВК, у зв'язку з розпадом Радянського Союзу, на металобрухт, про готовності 80%).

Головні складові частини різновидів водолазних комплексів [1-8] подано на рис. 1.1 і рис. 1.2. Головне обладнання ГВК складається із стаціонарної палубної барокамери компресії та декомпресії, підводної спускової камери (ПСК), спуско-під'ємного пристрою (СПП), блока автоматики (системи управління) з постом управління і зв'язку. Барокамера (декомпресійна камера) призначена для відносно тривалої поступової адаптації людини до дихально-газової суміші (ДГС) з підвищеним тиском (компресії), а також до наступної (після завершення підводних робіт) поступової адаптації до нормальних атмосферних умов (декомпресії). У

якості ДГС на глибинах до 500 м використовується повітряно-гелієва суміш, або кіснєво-гелієва суміш, а на більших глибинах – кіснєво-водородна суміш. Застосування кіснєво-гелієвої суміші (гримучий газ) вимагає вибухозахищеного внутрішнього обладнання водолазних кмер. ПСК (водолазний "дзвін") призначена для спуску та підйому акванавтів, а також тимчасового їх перебування на глибині. Після компресії та перед декомпресією акванавтів барокамера та ПСК з'єднуються герметично перехідним відсіком (комінгсом). У робочому стані спуску, підйому, та праці акванавтів,



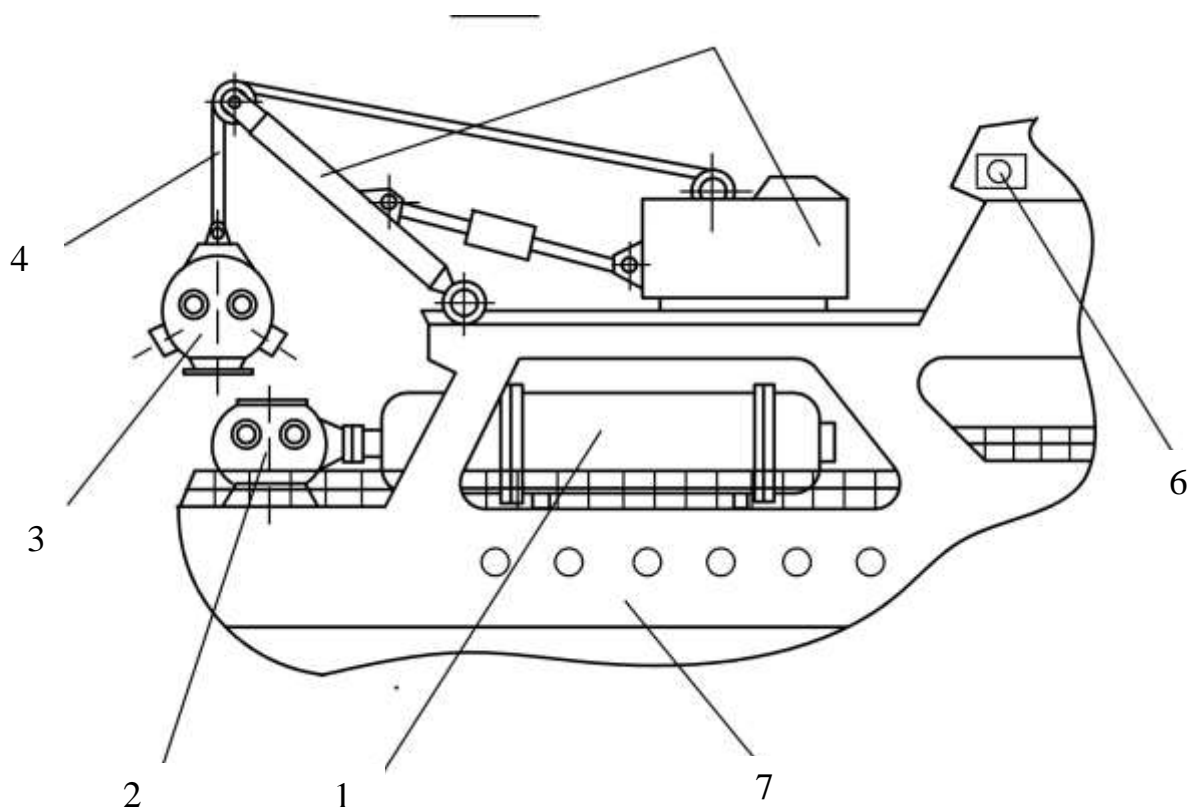


Рис. 1.1. Головні складові частини водолазного комплексу: 1 – палубна барокамера; 2 – перехідний відсік; 3 – водолазна камера; 4 – кабель-шланг-трос; 5 – кран; 6 – пост центрального управління підводним комплексом; 7 – кормова частина судна-носія.

елементи обладнання ГВК пов'язані багатofункційним механічним зв'язком – підводним тросом. Спуск та підйом акванавтів здійснюється за сигналами управління з центрального посту комплексу на судні, або посту управління ПСК, з використанням електроприводів обладнання СПП.

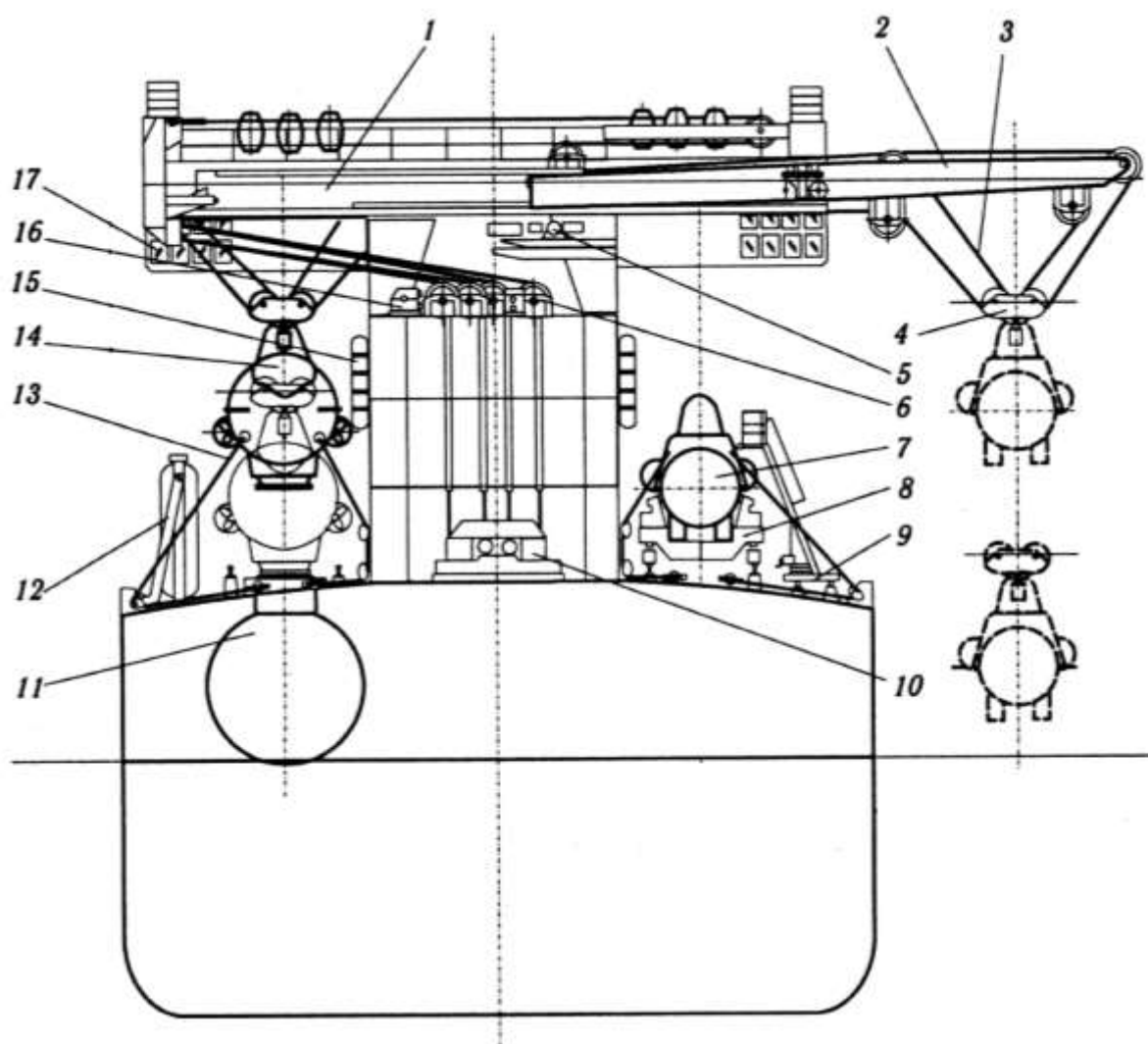


Рис. 1.2. Схема спуско-підйомного пристрою підводних апаратів: 1 – ферма; 2 – вируханий міст; 3 – елементи стріли; 4 – двохшківний підвіс; 5, 6 – видвідні блоки; 7 – підводний апарат; 8 – теліжка; 9 – телескопічний трап; 10 – вантажні лебідки; 11 – барокамера; 12 – поворотний кранцевий пристрій; 13 – канат центрування; 14 – водолазний дзвін; 15 – рубочний кранцевий пристрій; 16 – слідкуючи лебідки; 17 – пости управління.

Крім стаціонарних СПП (рис. 1.1), для спуску та підйому ПСК і інших підводних апаратів на суднах-носіях використовуються СПП з рухомими складовими частинами (рис. 1.2).

Схема реального СПП [9] пояснює склад механізмів вирухомого мостового крану обслуговування підводного обладнання (рис. 1.2). Комплекс обладнання крану уявляє собою підвійну для обслуговування правого і лівого борта будову, яка

забезпечує спуск-підйом різних підводних апаратів, їх транспортування у елінг і посадку ПСК на комінгс барокамери. Кран містить систему спуско-підйомних вантажних лебідок та систему слідкуючих лебідок обмеження хитами вантажу при морському хвилюванні, електродвигуни, силові блоки управління електроприводів лебідок, а також пост управління, з якого забезпечується добре візуальне спостереження та телевізійний контроль за діями на спуско-підйомній позиції та ситуації у елінгу.

У цілому комплекси ГВК складаються з головних та допоміжних систем. До головних відносяться комплексні системи обробки ДГС, спуску та підйому, електрообладнання, а також управління і зв'язку.

Система обробки ДГС містить обладнання компресії-декомпресії і складу газопостачання, обладнання теплопостачання, а також автоматичної і ручної підтримки температури й вологості ДГС. Теплопостачання камер може бути забезпечено способами електронагріву з використанням відповідно електрокалориферів або кабель-шлангів з теплоізолюючою оболонкою та теплообмінних апаратів.

Електропостачання ПСК може бути здійснено через кабель-трос стандартної напруги до 1 кВ та палубний триобмотковий трансформатор з вторинними робочою та пусковою обмотками, що перемикаються, або кабель-трос з баластними опорами зниження напруги на вході у ПСК. Наявність двох обмоток трансформатора, або баластних опорів, обумовлена відмінністю пускової та робочої потужностей низьковольтного силового обладнання ПСК. Третім варіантом електропостачання є використання кабель-тросу стандартної напруги та комплектація камер понижувальними трансформаторами з потужністю, яка відповідає пусковій потужності внутрішнього електрообладнання ПСК.

Виходячи з вимог енергоресурсозбереження у системі ГВК, що призначена для занурення на глибину вище 150 м, більш доцільним є використання занурювального трансформатора (рис. 1.3) та водяного теплопостачання через кабель-шланг-трос [1-8].

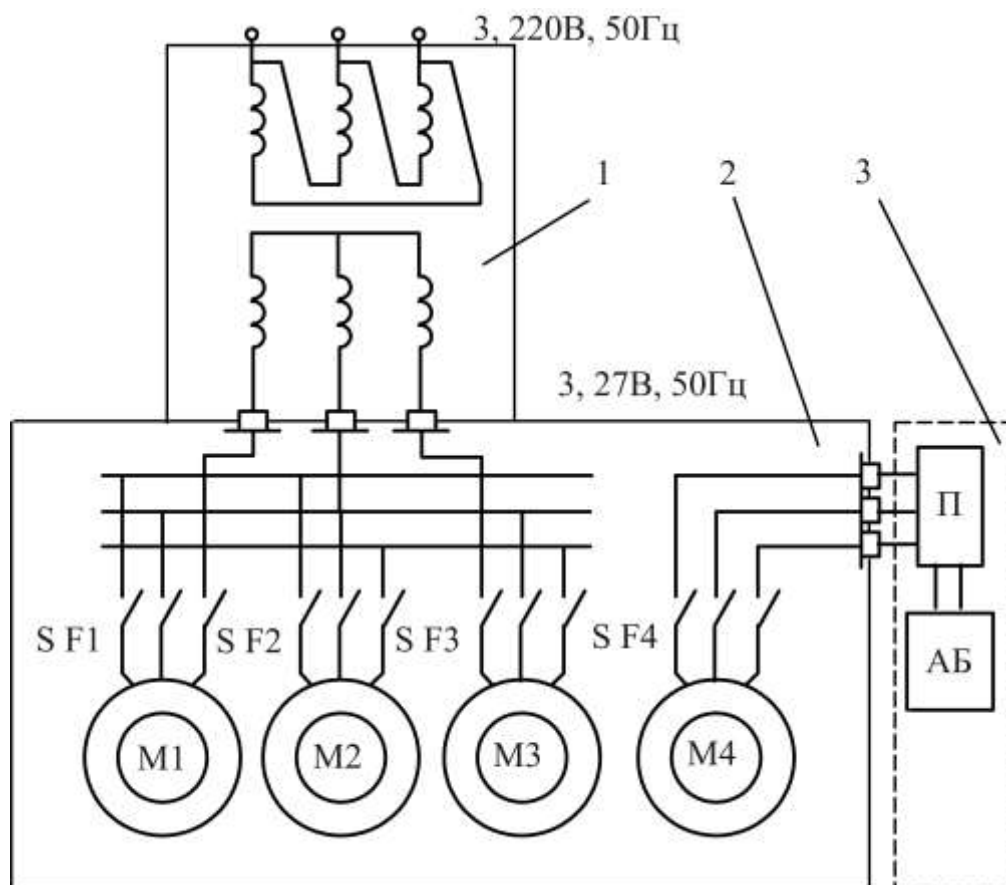


Рис. 1.3. Склад силового електрообладнання підводної спускової камери:

1 – занурювальний трансформатор; 2 – водолазний дзвін; 3 – блок перетворювача напруги П та акумуляторної батареї АБ; M1...M3 – електродвигуни агрегатів нагріву і очищення дихально-газової суміші; M4 – електродвигун агрегату аварійного очищення; SF1... SF4 – автоматичні вимикачі пуску двигунів.

Силове електрообладнання ГВК складається, згідно [1-8], з електродвигунів морського виконання стандартної трифазної напруги до 1 кВ та електродвигунів низької напруги, а також трансформаторів перетворення напруги. Електродвигуни стандартної напруги підключаються до суднової електричної мережі та призначені для приводу механізмів СПП (рис. 1.1, рис. 1.2) та для приводу нагнетувачів компресії – декомпресії барокамери. Вказані двигуни мають традиційну конструктивну схему, однак спеціальний асинхронний двигун (АД) приводу газогерметичного нагнетувача зовнішньої установки на барокамеру потужністю 3,0...4,0 кВт відрізняється газогерметичним виконанням та наявністю екранованого

статора (з металевою гільзою у робочому зазорі) [10]. Низька напруга 27 В, 50 Гц трифазного змінного струму використовується для живлення внутрішнього обладнання барокамери та ПСК (електровентілятори, електроосвітлення, комутаційна та пуско-захистна апаратура). Різновиди напруги ГВК забезпечуються вище згаданими трансформаторами – блочним та занурюваним, що підключені відповідно до суднової мережі та вихідним клемам кабель-шланг-тросу ПСК. До вказаних клем також підключена силова апаратура зовнішнього підводного освітлення.

## **1.2. Склад обладнання робочих камер**

Згідно [1-8] водолазні барокамери містять пристрої обробки ДГС і системи автоматичного та дистанційного управління температурою й вологістю ДГС (рис. 1.4). Автоматичне регулювання параметрів ДГС здійснюється на основі регулятора температури приточної ДГС, якій реалізує пропорційно-інтегральний закон регулювання зі зворотнім зв'язком по температурі з корекцією за величиною тиску за допомогою відповідних датчиків. Для компенсації внутрішніх охолоджень, або тепловиділень використовуються теплообмінні апарати (агрегати підігріву ДГС) з трубчатими теплообмінниками, у яких циркулює гаряча або холодна вода. Агрегати підігріву керуються ступінчастим регулятором зі зворотнім зв'язком за різницею приточної температури і температури у відсіках барокамери. Підтримка необхідного значення вологості ДГС забезпечується шляхом регулювання витрат води у теплообміннику – осушувачі. Виміри вологості здійснюються датчиками вологості. Для підвищення надійності передбачено можливість переключення системи кондиціонування ДГС жилої камери на прийомний відсік і навпаки. Також можлива робота одного агрегата на обидві камери.

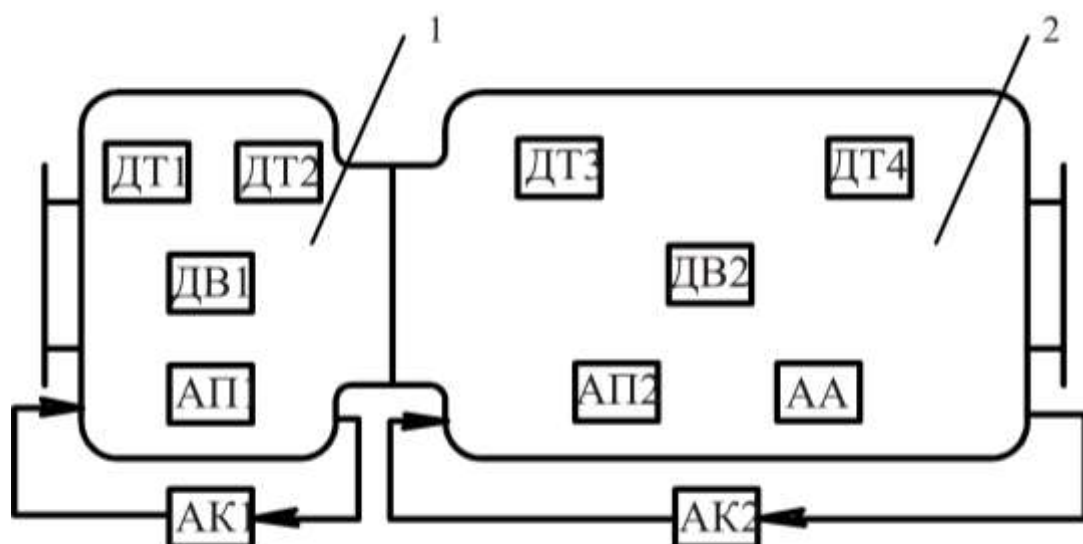


Рис. 1.4. Схема та обладнання барокамери: 1 – комінгс; 2 – житлова камера; АК1, АК2 – агрегати кондиціонування з газо герметичними нагнетувачами; АП1, АП2 – агрегати підігріву; АА – агрегат аварійного очищення дихально-газової суміші; ДТ1, ДТ3 – датчики температури приточної дихально-газової суміші; ДТ2, ДТ4 – датчики температури газової суміші внутрішньої камери; ДВ1, ДВ2 – датчики вологості внутрішньої газової суміші.

На рис. 1.5 подано електричну схему підключення обладнання СПК (цифри ліній електричних сполучень позначають фазність та тол шину перетину жил кабелю). Силове внутрішнє обладнання СПК складається з АД М1, М2 приводу вентиляторів агрегатів підігріву і АД М3 приводу вентилятора агрегату очищення ДГС у основному режимі, а також з АД М4 вентилятора агрегату аварійного очищення ДГС у режимі відключення електропостачання, або обриву кабель-шланг-троса. Включення М1...М4 здійснюється вручну за допомогою автоматичних вимикачів SF1...SF4 (рис. 1.3), які також забезпечують захист мережі від струмів короткого замикання. Контроль за функціонуванням АД ПСК забезпечується по лінії електричного зв'язку кабель-шланг-тросу, за якою на судно-носій надходить також інформація про тиск і температуру ДГС за допомогою вимірювальних перетворювачів тиску і комплектів вимірювання температури. Блоки вимірювальних приладів мають окремі корпуси водозахисного виконання з кабельним зв'язком з



пультом управління ПСК. Живлення вказаних приладів забезпечується постійним струмом напруги 27 В окремою лінією кабель-шланг-тросу.

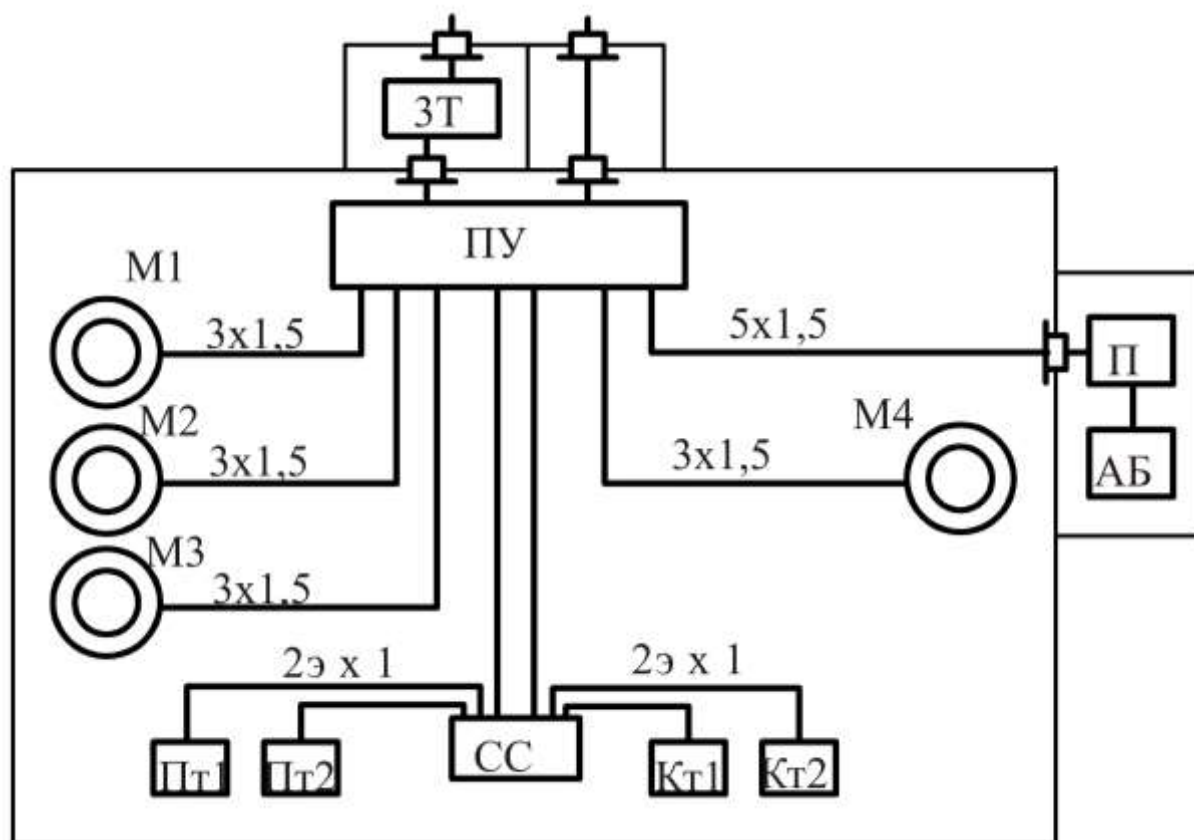


Рис. 1.5. Електрична схема підключень обладнання спускової підводної камери:

ЗТ – занурювальний трансформатор; ПУ – пульт управління; М1, М2 – електродвигуни агрегату нагріву; М3 – електродвигун агрегату очищення; М4 – електродвигун агрегату аварійного очищення; П – перетворювач напруги; АБ – акумуляторна батарея; СС – скринька сполучень; ПТ1, ПТ2 – вимірювальні перетворювачі тиску; КТ1, КТ2 – комплекти вимірювання температури.

АД М1, М2 агрегатів АП1, АП2 підігріву і АД М3 агрегату очищення ДГС у головному режимі (рис. 1.4, рис. 1.5) мають потужність 120..180 Вт, напругу живлення 27 В трифазним змінним струмом частоти 50 Гц та двохполюсне виконання (для зменшення маси і габаритів електровентилляторів). Електродвигун М4; агрегату АА (рис. 1.4, рис. 1.5) аварійного очищення ДГС від  $\text{CO}_2$  має потужність 60...90 Вт та одержує живлення від акумуляторної батареї постійної напруги 29...24 В (24 В – при практично розрядженій батареї) з періодом розрядки

24 години. Тому при застосуванні для аварійного очищення ДГС колекторних двигунів постійного струму повинно бути забезпечено їх герметичне виконання, а при застосуванні двигунів змінного струму система повинна містити напівпровідниковий перетворювач напруги П (рис. 1.3, рис. 1.5). Колекторний двигун має у 1,3...1,5 рази підвищені малогабаритні показники відносно АД та потребує обслуговування щітко-колекторного вузла. Маса та розміри такого двигуна підвищуються додатково при герметичному виконанні, а конструкція суттєво ускладнюється і надійність знижується у зв'язку з наявністю герметичного ущільнення лінії вал – підшипник. Тому в умовах функціонування обладнання камер ГВК більш доцільним є використання агрегату аварійного очищення з АД та перетворювачем напруги.

### **1.3. Удосконалення конструктивних і схемотехнічних рішень обладнання камер ГВК на основі електродвигуна спеціальної конструкції**

Головними елементами агрегатів обробки повітря ПСК є електровентилятор, теплообмінник та набій очищення повітря.

Високонапорні електровентилятори з двохполюсними АД (синхронна частота обертання 3000 об/хв) поділяються на центробіжні і центробіжні прямоточні [11]. У цих вентиляторах використовуються АД традиційної конструкції з циліндричним магнітопроводом та зовнішнім статором і внутрішнім ротором (рис. 1.6, а). З вказаного рисунку видно, що використання об'єму, що визначається габаритними розмірами механізму у цілому, дуже неповне, так як з причин площинної конфігурації спірального корпусу (равлику) і розвинутої осьової довжини, простір у зоні зовнішнього діаметру АД не використовується.

Повітрянагрівачі (повітряохолоджувачі) виконуються у вигляді як площинних (рис. 1.6, а) так і кільцевих циліндричних батарей (рис. 1.6, б і в) з трубчатими елементами теплообміну [12]. Площинний теплообмінник доцільно з'єднувати з вихідним патрубком, який у вентилятора (рис. 1.6, а) має прямокутний переріз.

Однак сполучення центробіжного вентилятора з площинним теплообмінником робить будову агрегату, що розглядається, ще більш громіздкою та габаритною.

У зв'язку з цим, в умовах функціонування морського обладнання, більш раціональним є використання кільцевих теплообмінників у вигляді компоновки з прямоточним вентилятором. На схемі (рис. 1.6, б) теплообмінник охоплює АД традиційної конструкції, що підвищує компактність агрегату.

Одним з напрямків підвищення технічного рівня обладнання комплексної обробки повітря є використання спеціальних АД з підвищеною конструктивною пристосовуваністю до вентиляторів [11, 13]. Подібні двигуни відрізняються оберненою конструктивною схемою (з зовнішнім ротором) або аксіальним робочим зазором (так звані аксіальні, або торцеві). Торцеві АД (ТАД) відрізняються малою осьюовою довжиною і підвищеним діаметром та раціонально поєднуються з центробіжними вентиляторами.

При застосуванні в агрегаті схеми (рис.1.6, б) ТАД звільняється простір зони розташування циліндричного АД. Вказаний простір може бути використаний для встановлення набою очищення повітря (рис. 1.6, в).

На схемах, що подані на рис. 1.6, стрілками вказані напрями руху ДГС у агрегатах її обробки. В агрегаті (рис. 1.6, в) ДГС послідовно змінює напрям руху на протилежний, що як відомо [14], забезпечує ефект глушення вентиляційного шуму, тобто корпус теплообмінника виконує функцію шумопоглинання.

На основі викладеного, у теперішній роботі пропонується загальну теплообмінну систему двох агрегатів підігріву АП1, АП2 (рис. 1.4) схеми (рис. 1.6, б) поділити на три секції трьох агрегатів (рис. 1.6, в), а замість одного набою агрегату головного очищення (двигун М3) у вказаних агрегатах додатково застосувати три набою (фільтра) меншого типорозміру, який використовується у агрегаті аварійного очищення АА з двигуном М4 (рис. 1.4, рис. 1.5). Це надає можливість суттєвого підвищення технічного рівня системи обробки ДГС ГВК та показників ПСК. Підвищений технічний рівень ПСК у цілому досягається уніфікацією агрегатів та дублюванням систем очищення у аварійному режимі, зниженням масогабаритних показників на основі відмови від окремого агрегату

аварійного очищення з двигуном М4 та поліпшення умов охолодження вбудованого ТАД (рис. 1.6, в) відносно АД (рис. 1.6, а і б), а також поліпшення віброакустичних показників агрегатів на основі шумоглушення та відмови від власних вентиляторів обдуву, які присутні в АД традиційної конструкції. У цілому кількість агрегатів і двигунів зменшується з чотирьох до трьох.

Однак для можливості здійснення запропонованої уніфікації та вдосконалення обладнання ГВК [8] необхідно зниження продуктивності вентилятора у аварійному режимі без зміни робочого колеса (крильчатки) та без суттєвого зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) АД. Вказане завдання може бути вирішено на основі зниження частоти обертання та потужності АД приблизно у два рази шляхом використання полюсноперемикаємої обмотки статора ТАД у співвідношенні полюсів  $2p_1/2p_2 = 2/4$  зі схемою з'єднань котушок на двох швидкостях подвійна зірка/зірка [15] (рис. 1.7).

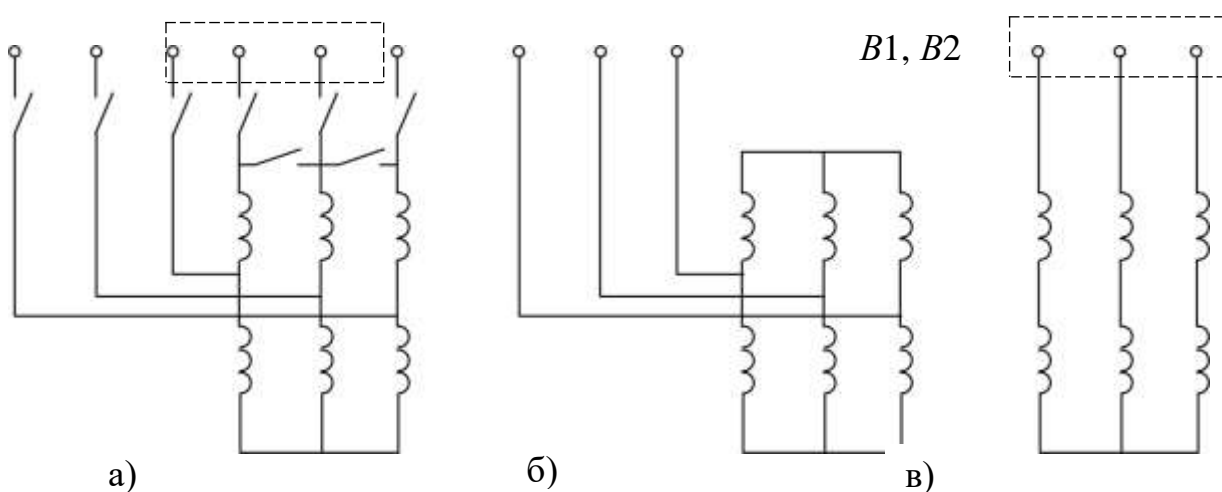


Рис. 1.7. Принципова схема двохшвидкісної обмотки з можливістю переключення у відношенні  $p_1/p_2 = 1/2$ : а – загальна схема; б – з'єднання подвійна зірка з  $2p = 2$ ; в – з'єднання зірка з  $2p = 4$ .

При використанні запропонованих схемотехнічних рішень (рис. 1.6, в, рис. 1.7) принципова схема силового обладнання (рис. 1.3) спрощується до вигляду (рис. 1.8).

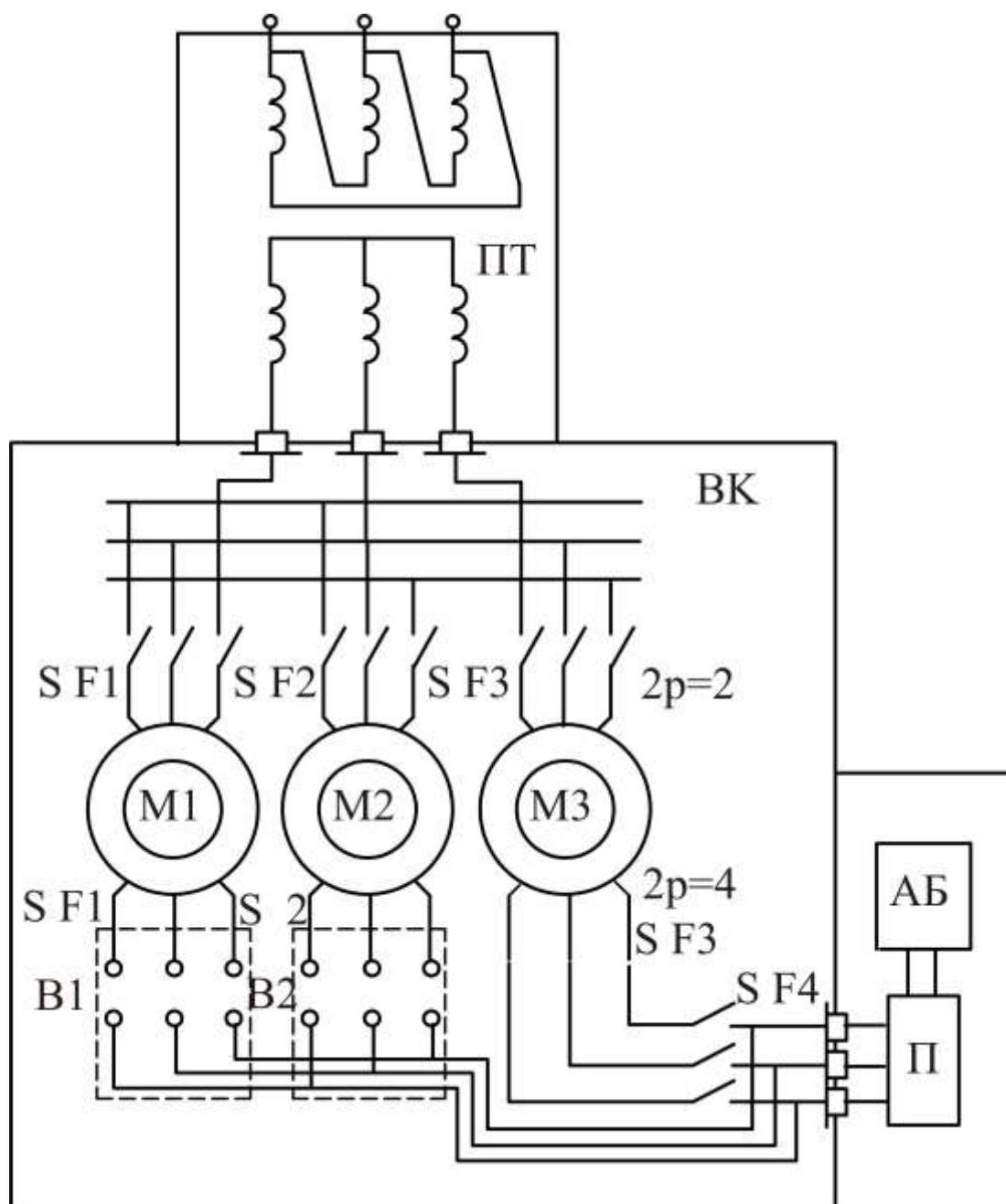


Рис. 1.8. Принципова схема уніфікованого електрообладнання агрегатів комплексної обробки дихально-газової суміші підводної спускової камери водолазного комплексу

Для можливості використання для аварійного очищення любого з агрегатів комплексної обробки ДГС двигуни M1 і M2 повинні мати відводи B1 і B2 котушкових груп фаз (рис. 1.7), а скринька сполучень (рис. 1.5) повинна передбачати можливість підключення вказаних відводів.

## 1.4. Висновки до розділу 1

1.4.1. Для можливості уніфікації та підвищення технічного рівня обладнання комплексної обробки повітря у агрегатах нагріву та очищення доцільно використання торцевих асинхронних двигунів з закріпленням робочого колеса вентилятора на зовнішньому торці дискового ротора.

1.4.2. Для здійснення уніфікації обладнання забезпеченням можливості його використання у основному і аварійному режимах необхідна розробка спеціального двохшвидкісного двигуна з полюсоперемикаємою обмоткою у співвідношенні  $2p_1/2p_2 = 1/2$ .

## Розділ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ НАГНЕТУВАЧІВ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ДИХАЛЬНО-ГАЗОВОЇ СУМІШІ

### 2.1. Аналіз варіантів конструкцій асинхронних двигунів для приводу вентиляторів

Електродвигуни, призначені для приводу суднових електровентиляторів, повинні раціонально сполучатися з конструктивними елементами вентиляторів, мати достатню жорсткість конструкції і понижені рівні власних вібрацій і шумів.

Спеціальні асинхронні двигуни (АД), що використовуються у теперішній час для приводу суднових осьових і центробіжних вентиляторів, повністю названим вимогам не задовольняють. В корабельних АД [12], а також спеціальних двигунах серій [11], що були перед ними, у порівнянні з загальнопромисловими, забезпечені пониженні рівні вібрації та шуму. Однак віброакустичні характеристики (ВАХ) вказаних АД не відповідають сучасним вимогам.

Конструкція активної частини спеціальних морських АД аналогічна конструкції електричних машин загальнопромислового призначення. В них використані відомі технічні рішення, спрямовані на покращення ВАХ. На рис. 2.1 надані залежності мас від потужності нижніх відрізків шкали потужностей дво полюсних ( $2p = 2$ ) корабельних АД і морської модифікації серії 4А [13]. З вказаного рисунку можна побачити, що покращення ВАХ в АД [13] досягнуто за рахунок погіршення масогабаритних характеристик (МХ). Причому, розробка серій АД 2ДМШ, 3ДМШ, замість попередніх серій АОМШ і ДМ, показала неможливість забезпечення сучасних ВАХ у частині магнітних складових вібрації в традиційній конструкції електричної машини на основі відомих засобів покращення ВАХ, і подальшого підвищення маси.

Другим недоліком двигунів [13], в складі центробіжних електровентиляторів являється невиправдане підвищення габаритних розмірів вентиляторних секцій агрегатів обробки повітря. На рис.2.1, а зображена схема відцентрового електровентилятора з двигуном традиційної конструкції.



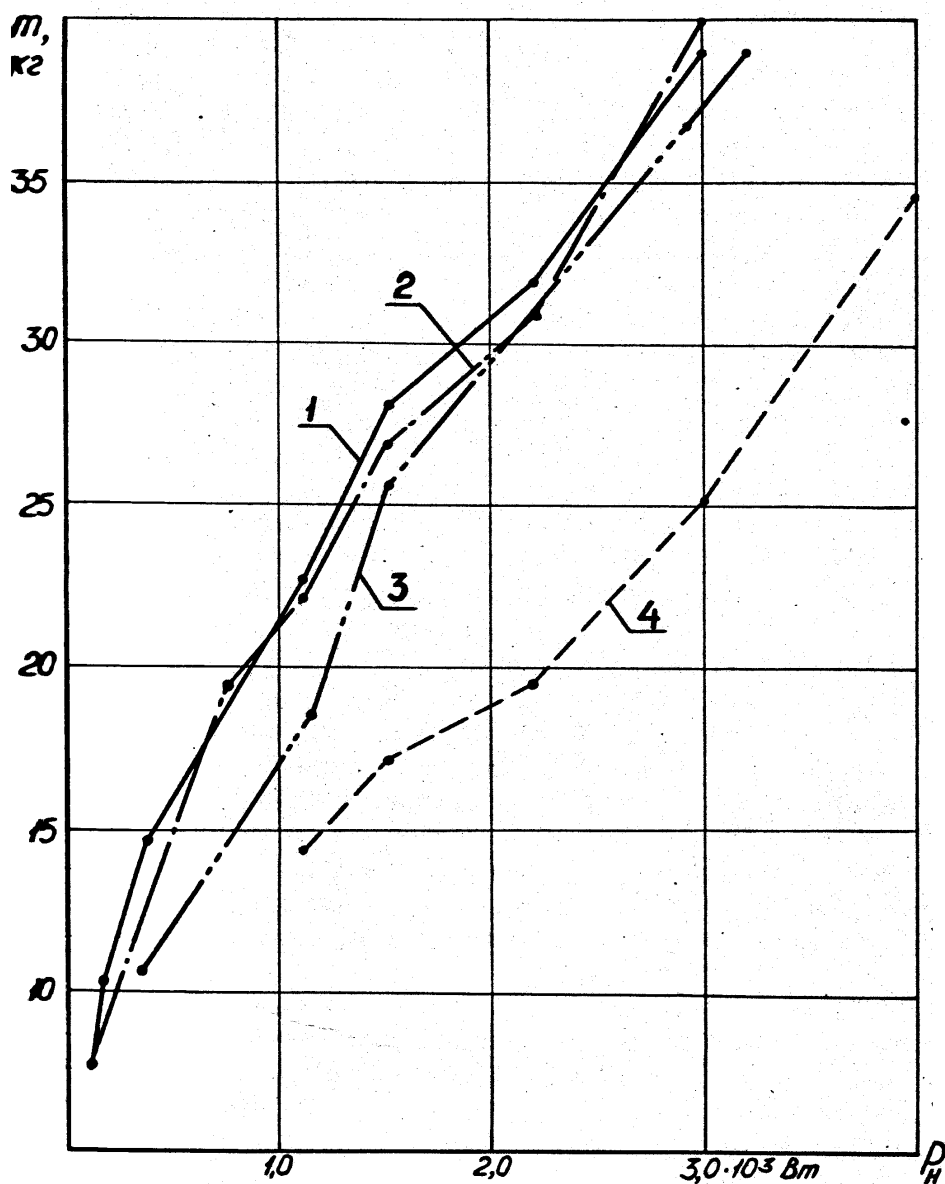


Рис. 2.1. Залежності маси від потужності спеціальних електродвигунів класичної конструкції:

1 – 2ДМШ і 3ДМШ; 2 – ДМ; 3 – АОМШ; 4 – 4АМ.

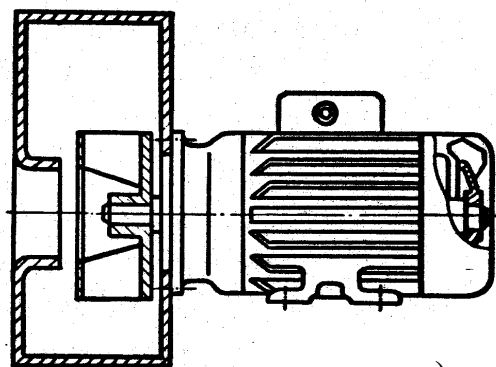
З даного рисунку видно, що використання об'єму, що визначається габаритними розмірами механізму у цілому, далеко не повне, так як через розвитку осову довжину простір в зоні зовнішнього діаметру АД не використовується. З одного боку на двигун навішані складові частини механізму, а з другого крильчатка

і кожух власного обдування. Несиметричність конструкції як АД, так і електровентилятора, підвищує число частот власних коливань системи у цілому, а наявність власної вентиляції АД обумовлює додаткове погіршення ВАХ та невиправдані енерговитрати на самовентіляцію при можливості примусової вентиляції.

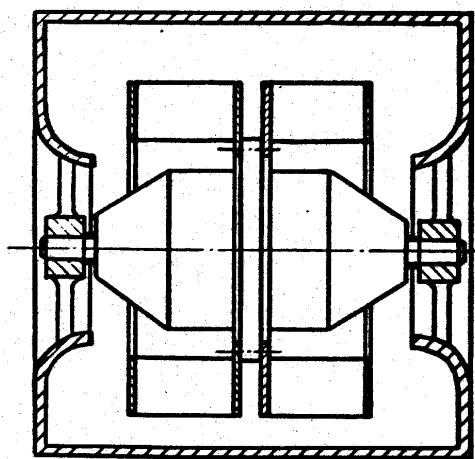
Одним з шляхів підвищення технічного рівня обладнання обробки повітря являється використання спеціальних АД з підвищеною конструктивною пристосованістю до вентиляторів - асинхронних двигунів з зовнішнім ротором (АДЗР) і торцевих асинхронних двигунів (ТАД).

АДЗР використовуються в суднових автономних місцевих кондиціонерах для приводу низько обертових центробіжних вентиляторів двостороннього всмоктування, а також для приводу центробіжних і осьових вентиляторів. На рис. 2.2, б надана схема відцентрового електровентилятора кондиціонера з АДЗР. Перевагою вказаного електровентилятора являються зменшені габаритні розміри та симетричність конструкції. В такій схемі знижуються механічні втрати та енерговитрати на власну вентиляцію двигуна, що охолоджується потоком повітря, який нагнітається здвоєним робочим колесом електровентилятора, закріпленого на фланці ротора. Двигун кріпиться соєю нерухомою віссю в спеціальних кронштейнах, що складають єдине ціле з корпусом вхідного патрубку вентилятора.

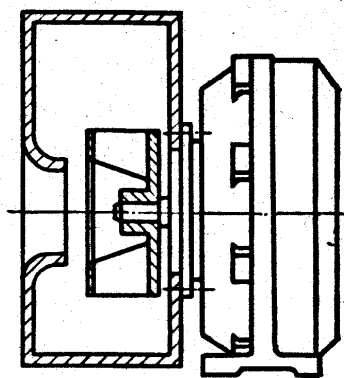
В обладнанні обробки повітря ТАД використовуються для приводу центробіжних вентиляторів і осьових вентиляторів і герметичних компресорів [14]. Використовування таких двигунів дозволяє суттєво скоротити розміри вказаних механізмів і покращити їх показники. Від АД класичної конструкції і АДЗР ТАД відрізняються плоскою формою активних поверхонь, малою осьовою довжиною і різноманітністю конструктивних виконань. На рис. 2.2 подана схема відцентрового вентилятора с ТАД. З рис. 2.2, а і в видно, що приєднувальні розміри і кінці валів ТАД можуть бути уніфіковані з серійними морськими двигунами, а корпус може мати несучу конструкцію що не потребує на відміну від АДЗР конструктивної переробки вентиляторів. Згідно [14], використання ТАД значно перспективно для приводу центробіжних вентиляторів загальносуднового призначення.



а)



б)



в)

Рис. 2.2. Схеми центробіжних електровентиляторів:

а – з двигуном традиційної конструкції  
 б – з вбудованим двигуном  
 в – з зовнішнім ротором; в – з торцевим двигуном.

АДЗР відрізняються від класичних двигунів зниженими витратами обмоткової міді за рахунок меншого середнього діаметру лобових частин, а при виробництві ТАД утворюються менші відходи електротехнічної сталі. АДЗР виробляються за звичайною технологією, а ТАД – нетрадиційними засобами. Однак існуючі конструкції вказаних двигунів мають гірше використання в електромагнітному відношенні зубців ротора і підвищений об’єм короткозамикаючих кілець. Це обумовлено тим, що на відміну від класичного ротора, середні діаметри зубців і кілець роторів АДЗР і ТАД перевищують відповідні діаметри двигунів класичної конструкції.

Недоліком відомих конструкцій АДЗР і ТАД при використанні на судах являється підвищений момент інерції ротора. При качці і поворотах судна ротори, підшипникові вузли і елементи кріплення судових механізмів обертового руху зазнають дію додаткового “гіроскопічного” навантаження, величина якого визначається виразом:

$$P_{\Gamma} = M_{\Gamma} / l_n = Y_R \Omega \omega_R / l_n, \quad (2.1)$$

де  $M_{\Gamma}$  - гіроскопічний момент;  $l_n$  - відстань між опорами ротора;  $Y_R$ ,  $\Omega$  і  $\omega_R$  - момент інерції, а також кутові частоти переміщення і обертання ротора.

Момент інерції  $Y_R$  визначається відомим виразом:

$$Y_R = \sum_{i=1}^{i=n} m_{R_i} R_i^2, \quad (2.2)$$

де  $m_{R_i}$  і  $R_i^2$  - маса і радіус інерції  $i$  – ї частини  $n$  частин ротора.

У зв’язку з підвищеними масами і діаметрами роторів, навантаження, що сприймаються конструктивними елементами розглянутих двигунів при качці і маневруванні судна значно вище, чим звичайних двигунів. Цей фактор потребує підсилення підшипників та інших елементів конструкції, тобто підвищення металоемності і дорожчання двигунів.

## **2.2. Конструкції елементів корпусу і підшипникових вузлів торцевих асинхронних двигунів**

Вибір конструктивної схеми ТАД визначається на основі аналізу впливу конструкції опор і елементів корпусу на техніко-економічні показники і вимог, що пред'являються до АД у морських умовах експлуатації.

Корпус і опори можуть бути консольної, одноопорної або рознесеної конструкції [15]. Кожна конструктивна схема повинна забезпечувати достатню міцність, жорсткість і надійність роботи ТАД відповідно з його призначенням.

Одним з факторів, що визначають надійність електричної машини, являється ступінь рівномірності робочого зазору. З підвищенням нерівномірності робочого зазору підвищується нерівномірність нагріву обмоток статора і ротора. У місці мінімального зазору виникає підвищений нагрів підклинової зони обмотки статора. З підвищенням нерівномірності зазору підсилюються низькочастотні складові магнітної вібрації. Вказані фактори приводять до швидкого старіння ізоляції. Крім того, згідно [16], нерівномірність зазору являється причиною виникнення посилюючих знос підшипників підшипникових струмів у наслідок наявності електричної напруги у валу.

Таким чином, нерівномірність (ексцентриситет) зазору АД являється одним із найбільш негативних факторів, що впливають на ресурс і надійність, і повинна бути зведена до мінімуму всіма можливими конструктивними і технологічними прийомами.

Для зменшення ексцентричності зазору необхідно підвищення точності механічної обробки активних і посадочних поверхонь ТАД, а також ослаблення впливу на двигун люфту підшипників.

Заманлива розробка, як найбільш простої, схеми ТАД з одноопорною установкою ротора. Аналіз впливу конструктивної схеми на рівномірність робочого зазору проведений в [15], де встановлено залежність нерівномірності аксіального

зазору ТАД від конструктивних факторів підшипника в одноопорній схемі установці ротора (рис. 2.3):

$$\Delta\delta^{('')} = \Delta_{\text{л}} D_{\text{с}}^{(')} / D_{\text{шп}} , \quad (2.3)$$

де  $\Delta\delta^{('')}$  - величина аксіального ексцентриситету, викликана люфтом підшипника;  
 $\Delta_{\text{л}}$  - величина люфту підшипника;  $D_{\text{шп}}$  - діаметр, що дорівнюється відстані між центрами протилежно розташованих шариків підшипника.

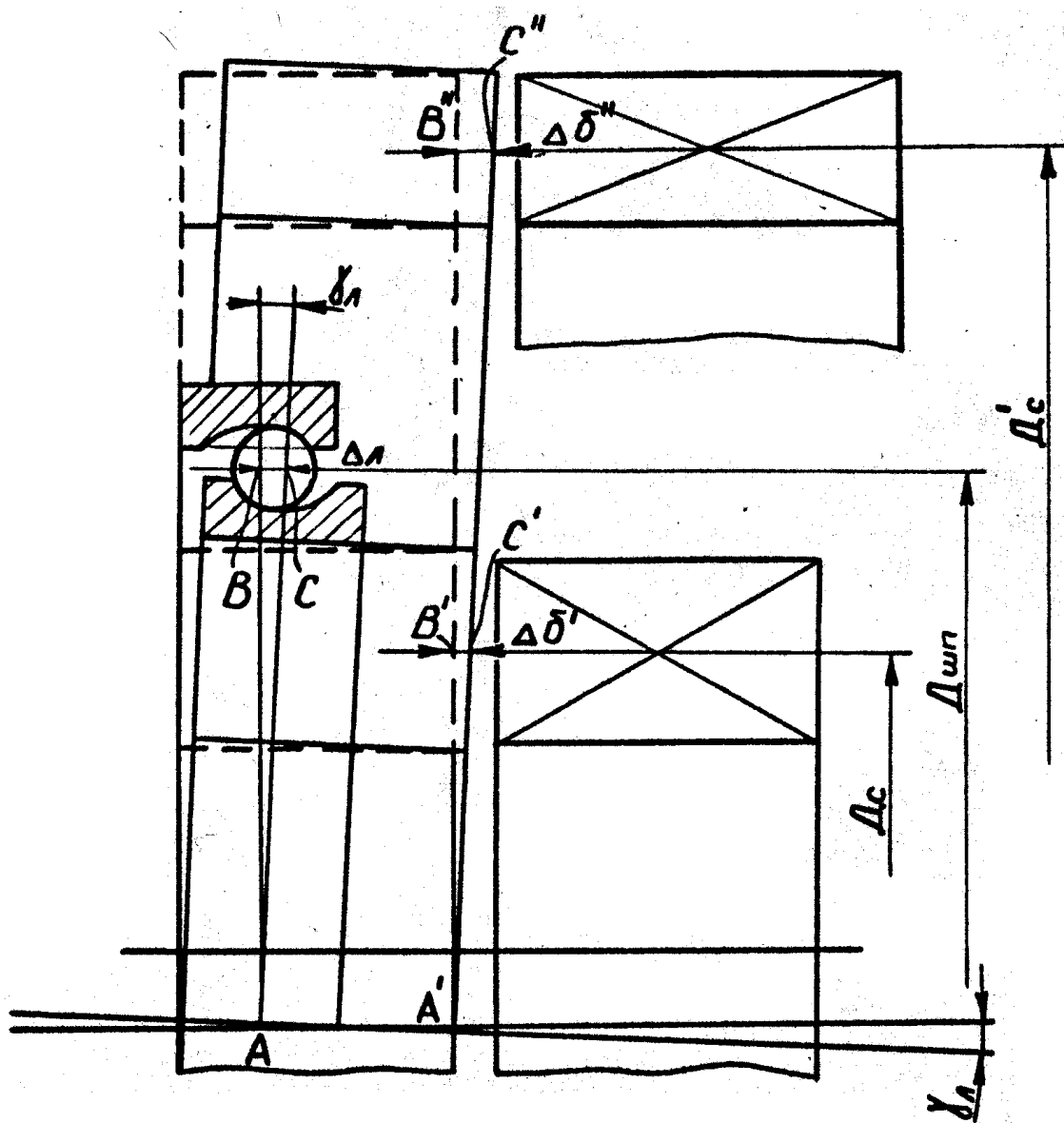


Рис. 2.3. Вплив люфту і розташування підшипника на ексцентриситет аксіального зазору

В [15] також показано, що для двоопорних конструкцій (рис. 2.4 – рис. 2.6) величина ексцентриситету зазору на середньому діаметрі:

$$\Delta\delta = D_c e_\Sigma / l_n, \quad (2.4)$$

де  $e_\Sigma$  – величина ексцентриситету осі валу відносно осі двигуна в площині підшипника, що визначається алгебраїчною сумою похибок виготовлення і люфтів підшипників.

Вирази (2.3) і (2.4) показують можливість зниження аксіального ексцентриситету  $\Delta\delta$ , а також, що ця величина у значній ступені залежить від конструктивного конструювання ТАД.

З (2.3) слідує, що у випадку одноопорної установки ротора на валу (або ротора з валом у корпусі) при  $D_{\text{шп}} \ll D'_c$  ТАД не працездатний, так як величина ексцентриситету  $\Delta\delta$  може перевищити величину номінального зазору. Виключенням являється одноопорна конструкція ТАД [15] з ротором, вбудованим у внутрішню обойму підшипника великого діаметру, в котрій  $D_{\text{шп}} \gg D_c$ . Вказана конструкція (рис. 2.7) відрізняється високою компактністю і зниженою металоємністю при достатній механічній міцності, обумовленою високою вантажопідйомністю підшипника великого діаметру. Разом з цим підшипники великого діаметру, згідно [15], не допускають високих частот обертання. Цьому конструкція [16] приємна в двигунах обмеженої потужності та частоти обертання і потребує розробки спеціальних підшипників.

З (2.4) слідує, що з підвищенням відстані між підшипниками ексцентриситет зменшується. Максимальну відстань між підшипниками, а також жорсткість і віброударостійкість конструкції, забезпечує рознесена конструктивна схема ТАД з розташуванням опор ротора у двох підшипникових щитах.

Однак в технічному завданні передбачена розробка конструкції ТАД, яка відповідає вимогам мінімальної маси та металоємності, а також можливості максимального спрощення конструкції електровентилятора при ефективному охолодженні електродвигуна. На перший погляд, вказаному завданню відповідають різновиди консольної схеми (рис. 2.4), у яких на відмову від схеми з двома

підшипниковими щитами (рис. 2.5) ротор обертається у відкритому повітрі, або у середовищі, яке нагнітає вентилятор.

Вказаними різновидами ТАД з валом, що обертається і проходить через центральний отвір консолі є консольно-суміщена (рис. 2.4, а) та консольно-рознесена (рис. 2.4, б). Існує також консольно-суміщена схема ТАД з установкою ротора на центральній нерухомій осі (рис. 2.6). ТАД схем, представлених на рис. 2.4 і рис. 2.6 згідно з [16] випускалися рядом країн Європи. Використання схеми ТАД (рис. 2.6) у якості вбудованого двигуна вентилятора відомо у Німеччині [16].

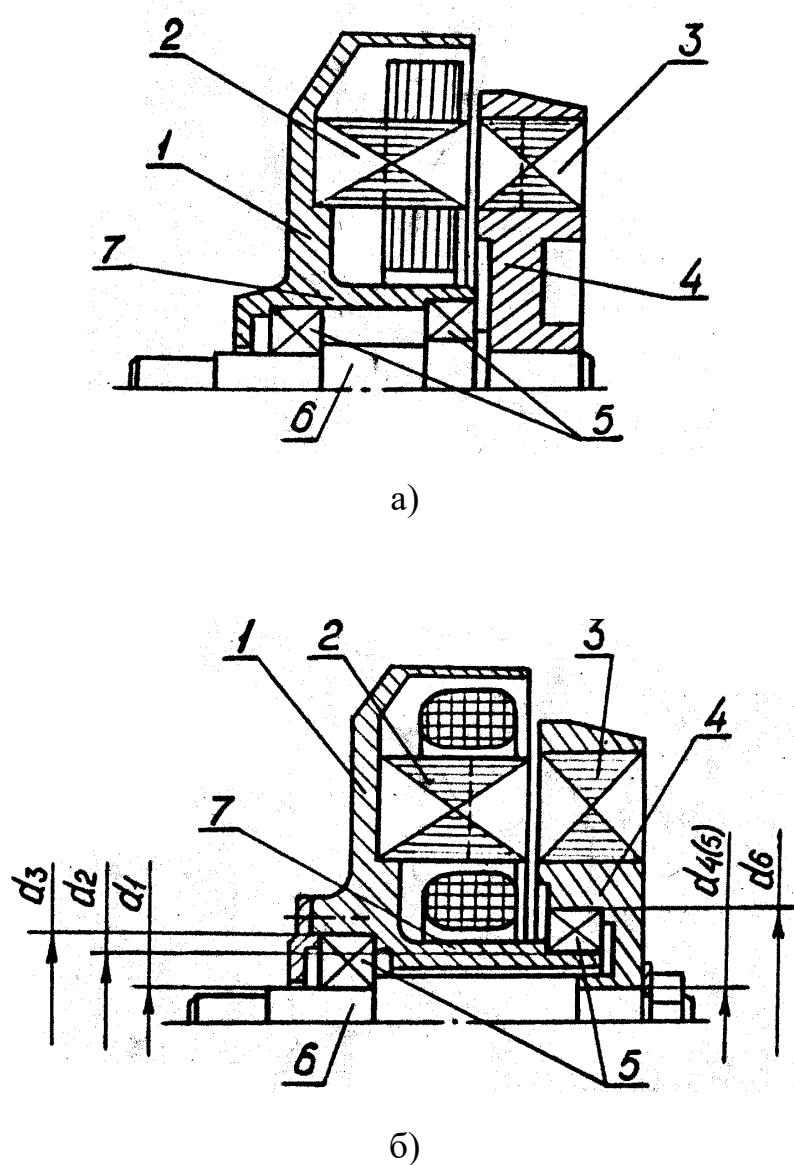


Рис. 2.4. Консольно – суміщена схема ТАД з кріпленням ротора на валу, що обертається, який встановлений в консолі корпуса (а) та консольно-рознесена схема ТАД з установкою ротора на консолі корпуса і валу, що обертається (б):



1 – корпус; 2 – статор; 3 – ротор; 4 – маточина ротора; 5 – підшипник; 6 – вал;  
7 – консоль корпуса.

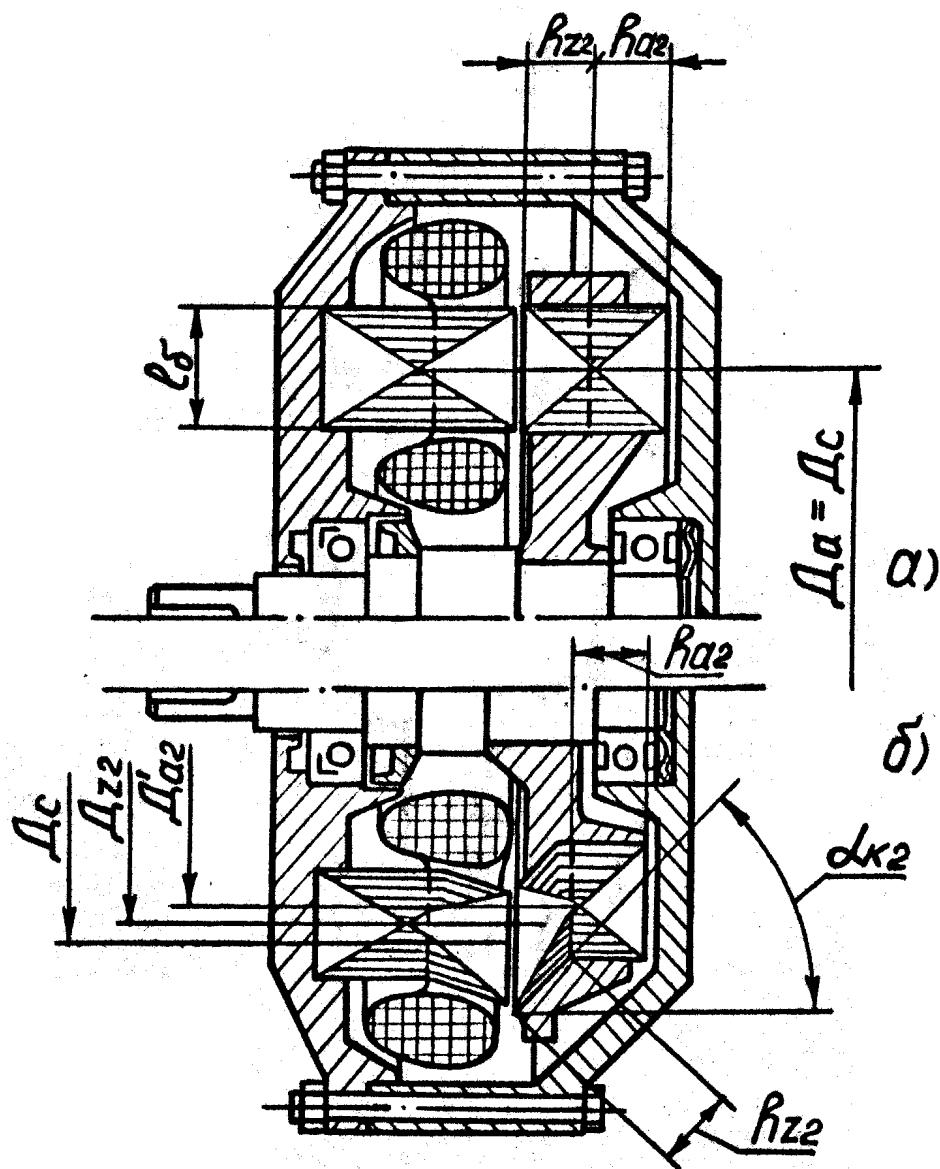


Рис. 2.5. Конструктивні схеми торцевого двигуна з рознесеним встановленням ротора та традиційним торцевим магнітопроводом (а) і з магнітопроводом з конічними поверхнями зубців на зовнішньому і внутрішньому діаметрах (б)

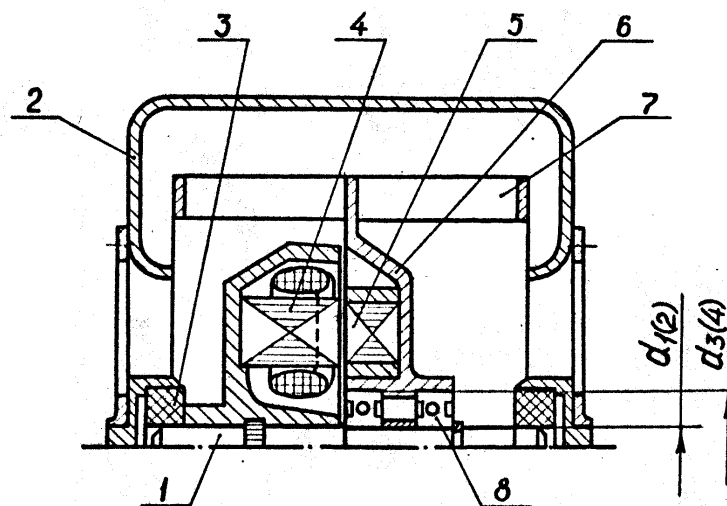


Рис. 2.6. Консольно – суміщена схема ТАД з установкою ротора на консольній осі корпуса у складі електровентильатора (фірма “FISCHBACH” Німеччина):

1 – нерухома ось; 2 – корпус; 3 – амортизатор; 4 – статор; 5 – ротор; 6 – маточина;  
7 – подвоєне колесо; 8 – підшипники.

Однією з вимог, що ставляться до вбудованого ТАД для приводу вентилятора з кріпленням маточини робочого колеса на роторі, являється обмеження зовнішнього діаметру двигуна.

Зовнішній діаметр корпуса ТАД визначається величиною діаметрів активної поверхні, що залежать у свою чергу, від заповнення зони внутрішнього діаметру магнітопроводу лобовою частиною статора і конструкційними елементами [14]. Тому схема ТАД (рис. 2.4, а) з розташуванням підшипників в зоні внутрішньої лобової частини по компактності і металоємності активних елементів уступає схемам, наданим на рис. 2.4, б, рис. 2.5 і рис. 2.6.

На рис. 2.4, б і рис. 2.6 також показані поверхні вузлів ТАД, що підлягають точній механічній обробці. Порівняння вказаних схем показує, що консольно-рознесене компонування ТАД (рис. 2.4) забезпечує велику метало- та трудомісткість виробництва із-за підвищення кількості деталей і поверхонь, що обробляються, у порівнянні зі схемою (рис. 2.6). Однак недоліком ТАД (рис. 2.6) у порівнянні з ТАД

(рис. 2.4, б і рис. 2.5) являється менша величина рознесення підшипників при розташуванні їх в об'ємі, обмеженому площинами торців ротора.

Вказаний недолік усувається шляхом підвищення довжини консольних виступів осі корпуса і маточини ротора. При цьому виникає другий недолік – підвищуються довжина консолі корпуса, осьовий розмір і металоємність ТАД. Однак кінцева частина виступаючої консольної вісі може використовуватись для додаткового кріплення ТАД в механізмі, наприклад, відцентровому вентиляторі двостороннього засмоктування (рис. 2.6), що підвищує усталеність і віброударостійкість консольної схеми ТАД і системи у цілому.

Загальним недоліком консольних схем ТАД являється розташування одного або двох підшипників в зоні, яка охоплюється внутрішніми лобовими частинами статора або ротора, що підвищує температуру і знижує надійність роботи підшипників. Вказаний недолік потребує організації охолодження підшипників.

### **2.3. Технічні рішення двополюсного асинхронного двигуна малої потужності**

Важним завданням зниження металоємності і, згідно з (2.1) і (2.2), підвищення надійності ТАД являється зниження об'єму і маси елементів ротора.

Вказане зниження можливо підвищенням щільності струму кілець і стержнів, а також середнього значення індукції у ярмі короткозамкненого ротора. Але цей засіб неприйнятний через погіршення енергетичних характеристик.

Існує можливість зниження маси ротора ТАД шляхом підвищення Індукції в недовикористаних зубцях ротора. При цьому заданий перетин стержнів ротора може бути забезпечено при більшій ширині пазів  $b_{п2}$  і меншій висоті зубців  $h_{z2}$  (рис. 2.6, а). Однак цей засіб обмежений можливістю забезпечення допустимої ширини зубця на внутрішньому діаметрі ТАД та збільшенням відкритості пазів, що приведе к погіршенню ВАХ, робочих та пускових характеристик.



Другими засобами зниження маси і металоємності ТАД являються зменшення середніх діаметрів елементів активної частини, а також виключення насичення зони зовнішніх діаметрів ярма статора і ярма ротора.

Завдання покращення використання активного об'єму ТАД вирішене в [14] шляхом зсуву циліндричних поверхонь ярма до осі на основі заміни циліндричних поверхонь зубців (рис. 2.5, а) конічними (рис. 2.5, б). В такій конструкції магнітопроводу при підвищенні кута конусності зубців  $\alpha_{к2}$  без зміни площ перерізів ярма і кілець відповідно знижуються об'єми і маси ярма і короткозамикаючих кілець, а також втрати в короткозамкненій клітці.

Використання конструкції [14] дозволяє знизити масу і металоємність ТАД без погіршення пускових характеристик, так як підвищення активного опору ротора (рис. 2.5, б) при пуску визначається не зменшеною аксіальною висотою зубців  $h'_{z2}$ , а довжиною  $h_{z2}$  проходження потоку в зубцях (в напрямку шихтовки зубцевого шару під кутом  $\alpha_{к2}$ ). При цьому зниження маси магнітопроводу ротора ТАД характеризується виразами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta D_a &= 2h_{z2} \sin \alpha_{к2}; \\ \Delta m_a &= 2\pi\gamma_c l_\delta h_{a2} h_{z2} \sin \alpha_{к2}; \\ \Delta D_z &= \gamma_c z_2 l_\delta h_z (b_{z2} - b'_{z2}) = \pi\gamma_c l_\delta h_{z2}^2 \sin \alpha_{к2}, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

де  $D_{a(z)}$  и  $\Delta D_{a(z)}$ ,  $\Delta m_{a(z)}$  – відповідно середні діаметри і зменшення середніх діаметрів і мас ярма (зубців) ТАД.

Зменшення маси ротора ТАД, що визначається виразом (2.5), складає в залежності від  $\alpha_{к}$ , 25...40%.

У випадку можливості розміщення внутрішніх лобових частин обмотки, зубці статора також можуть бути виконаними з конічними радіальними поверхнями (рис. 2.5, б), що дозволяє знизити середню довжину витка, об'єми матеріалів і втрати в обмотці і ярмі статора ( $D_{z2} < D_c$ ).

Підвищення використання активного об'єму ТАД при збереженні площі пазів статора (ротора) досягається за рахунок зменшення середньої ширини  $b_{z1(2)}$

недовикористованих зубців до величини  $b'_{z1(2)}$  і підвищення середнього значення індукції зубців  $B_{z1(2)}$ . Однак підвищення магнітної напруги зубців і сумарної МДС, що досягається при цьому, виправдане зниженням маси і металоємності і компенсується зниженням втрат ТАД і частково зниженням довжини замикання силових ліній поля та магнітних напруг ярем.

Підвищення потужності в заданому об'ємі шляхом підвищення електромагнітного моменту, або зниження маси і металоємності, можливо формуванням рівномірного або зростаючого розподілу індукції у зазорі  $B_\delta$  у напрямку від  $D_v$  до  $D_n$  [15]. Формування вказаного розподілу досягається використанням ярма з трапецієвидним перерізом. При цьому більшому потоку і більшій довжині силової лінії в зоні зовнішнього діаметру відповідає більша площа елемента перерізу ярма, а зайвий недовикористаний об'єм ярма (прямокутного перерізу) як би перерозподіляється в зону зовнішнього діаметру [14]. Згідно [15] ярмо витого магнітопроводу із стрічки постійної ширини повинно містити додаткову складову частину трикутного перерізу із ФМКМ (рис.2.8, а). В [15] ярмо торцевого магнітопроводу пропонується виконувати з частин, розташованих коаксиально відносно ТАД та які мають осьову довжину, що перевищує осьову довжину частини, що охоплюються (рис. 2.8, б). У вказаних рішеннях також забезпечується підвищення висоти і перерізу ярма в зоні максимального потоку і виключаються недовикористана маса ярма на внутрішньому діаметрі.

Ускладнення конструкцій магнітопроводу (рис. 2.8, а і б) можна уникнути забезпеченням трапециєвидного перерізу пазів з висотою, що зменшується у напрямку зовнішнього діаметра.

Порівняння консольної (рис. 2.4, рис. 2.6), рознесеної (рис. 2.5) і одноопорної (рис. 2.7) конструкцій ТАД. На підставі (2.1) – (2.4) та вище наведених міркувань, можна визначити наступні переваги одноопорної схеми (при малої потужності) за слідуючими причинами:

- менше заповнення зони внутрішнього діаметра магнітопроводу конструктивними елементами;

- значна віброударостійкість, обумовлена значною жорсткістю підшипника зовнішнього встановлення;
- поліпшені умови роботи підшипникового вузла, завдяки його віддаленням від зони максимального нагріву ТАД – зони внутрішнього діаметру магнітопровода;
- можливість зменшення ексцентриситету зазору і забезпечення величини зазору без додаткових регулювань.

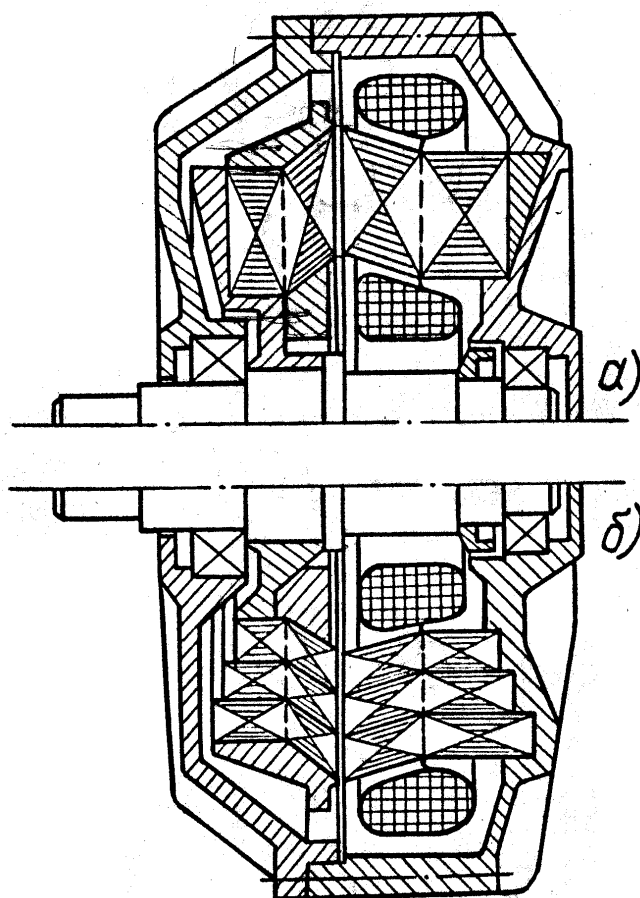


Рис. 2.8. Конструктивні схеми ТАД з поліпшеним використанням активного об'єму з феромагнітними основами ярів статора та ротора трикутного перерізу (а) і з ярмами, що складаються з коаксіальних елементів різної осьової довжини (б)

## 2.4. Висновки до розділу 2

2.4.1. У випадку проектування двигуна потужністю  $\leq 0,55$  кВт для привода малогабаритного електровентилятора необхідно віддати перевагу схемі АД (рис. 2.7), як найбільш повно задовольняючий вимогам мінімальних габаритних розмірів і підвищеної надійності.

2.4.2. Схема ТАД (рис. 2.7) відрізняється високою компактністю, малими витратами конструкційних матеріалів при достатньої жорсткості обумовленої значною вантажопідйомністю підшипника.

2.4.3. Для покращення масогабаритних показників ТАД та підвищення надійності і віброударостійкості, доцільно використання конусно-циліндричного магніто проводу зі зменшеною масою та моментом інерції ротора. Використання схеми (рис. 2.7) для приводу вентилятора забезпечує кріплення робочого колеса безпосередньо до ротора і максимальне зниження габаритних розмірів електровентилятора. При цьому додатково поліпшується охолодження за рахунок тепло відводу з ротора на лопатки. Для захисту обмотки статора від зовнішнього середовища використовується капсулювання статора (рис. 2.7) діелектричним компаундом з епоксидного компаунду з пиловидним кварцем.



### Розділ 3. РОЗРАХУНОК СПЕЦІАЛЬНОГО ДВИГУНА СИСТЕМИ ОБРОБКИ ДИХАЛЬНО-ГАЗОВОЇ СУМІШІ

#### 3.1. Визначення головних розмірів та геометричних співвідношень активної частини

При розрахунку головних розмірів та геометричних співвідношень використано методику [17, 18].

3.1.1. Проектне завдання: номінальна потужність  $P'_H/P''_H = 250/140$  Вт; синхронна частота обертання  $n'/n'' = 3000/1500$  об/хв.; лінійна напруга  $U_{1л} = 27$  В; частота мережі - 50 Гц, кількість фаз  $m = 3$ ; спосіб з'єднання зірка/подвійна зірка; номінальний режим тривалий; виконання – вбудоване з капсульованим статором та вологостійким покриттям; спосіб охолодження – примусова незалежна вентиляція; кратність пускового струму  $k_I \leq 6$  кратність пускового моменту  $k_{m \geq} 0,8$ ; кратність максимального моменту  $k_{mm} \geq 2$ ; виконання за кліматичними умовами і категорією розміщення – ОМ5 (необмежений район плавання, можливість контакту з морською водою).

3.1.2. Кількість пар полюсів  $p$ , кількість пазів на полюс і фазу  $q_s$ , кількість пазів статора (у розрахункових формулах величини та параметри при швидкості  $n' = 3000$  об/хв. мають позначку "штрих", а при швидкості  $n'' = 1500$  об/хв. відповідно подвійний "штрих):

$$p' = \frac{f \cdot 60}{n'} = \frac{50 \cdot 60}{3000} = 1; \quad p'' = \frac{f \cdot 60}{n''} = \frac{50 \cdot 60}{1500} = 2;$$

$$q'_s = 4; \quad q''_s = 2;$$

$$Z_s = 2p'mq'_s = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 2p''mq''_s = 4 \cdot 3 \cdot 2 = 24.$$

3.1.3. Розрахункова потужність

$$(P')' = \frac{K'_e \cdot P'_H}{\eta'_H \cos' \varphi_H} = \frac{0,96 \cdot 0,25}{0,72 \cdot 0,76} = 0,439 \text{ кВт} \cdot \text{А};$$

$$(P'')'' = \frac{K''_e \cdot P''_H}{\eta''_H \cos'' \varphi_H} = \frac{0,95 \cdot 0,14}{0,63 \cdot 0,72} = 0,293 \text{ кВт} \cdot \text{А},$$

де  $K'_e=0,96$ ,  $K''_e=0,95$  – коефіцієнт відношення ЕРС і напруги;  $\eta'_H=0,72$ ,  $\eta''_H=0,63$  – попереднє значення ККД;  $\cos'\phi_H=0,76$ ,  $\cos''\phi_H=0,72$  – попереднє значення енергетичного коефіцієнту.

### 3.1.4. Попереднє значення фазного струму

$$I'_{1H} = \frac{P'_H \cdot 10^3}{m_1 U_1 \eta'_H \cos\phi'_H} = \frac{0,25 \cdot 10^3}{3 \cdot 15,588 \cdot 0,72 \cdot 0,76} = 9,77 \text{ A};$$

$$I''_{1H} = \frac{P''_H \cdot 10^3}{m_1 U_1 \eta''_H \cos\phi''_H} = \frac{0,14 \cdot 10^3}{3 \cdot 15,588 \cdot 0,65 \cdot 0,72} = 6,4 \text{ A},$$

де  $U_1 = U_{1л} / \sqrt{3} = 27 / \sqrt{3} = 15,588 \text{ В}$  – номінальна фазна напруга.

3.1.5. Електромагнітні навантаження для АД потужністю 0,12...0,55 кВт при  $2p = 2$  знаходяться у межах: індукція зазору  $B'_\delta=0,5...0,7 \text{ Тл}$ , лінійне навантаження  $A'=120...200 \text{ А/см}$ . Приймається  $B'_\delta=0,596 \text{ Тл}$ ,  $A'=149,3 \text{ А/см}$ ;  $B''_\delta=0,379 \text{ Тл}$ ,  $A'=196 \text{ А/см}$ .

3.1.6. Приймаються значення коефіцієнтів заповнення магнітопроводу  $k_{зм}=0,95$  (товщина стрічки електротехнічної сталі 0,5 мм) та заповнення паза статора міддю  $k_{зп}=0,33$ .

3.1.7. Кількість  $n_{ел}$  елементарних провідників у ефективному, перетин та діаметр елементарного провідника  $S_{ел}$  та  $d_{ел}$ , визначаються та обираються:

$$S_{ел} = \frac{I'_{1H}}{a' n_{ел} \Delta'_s} = \frac{I''_{1H}}{a'' n_{ел} \Delta''_s} = \frac{9,77}{2 \cdot 3 \cdot 6,62} = \frac{6,4}{1 \cdot 3 \cdot 8,672} = 0,246 \text{ мм}^2,$$

де  $a' = 2$  – кількість паралельних гілок за схемою з'єднання обмотки подвійна зірка при  $2p = 2$  та  $a'' = 1$  – кількість паралельних гілок за схемою з'єднання обмотки зірка при  $2p = 4$ ;  $n_{ел} = 3$ ;  $\Delta'_s (\Delta''_s)$  – густина струму обмотки при  $2p = 2(4)$ , у випадку примусової вентиляції знаходиться у межах  $\Delta_s = 6,5...9,5 \text{ А/мм}^2$ . У зв'язку з необхідністю підвищеного значення ККД, що обумовлюється заданою тривалістю живлення двигуна від акумуляторної батареї через перетворювач (1 доба), обирається  $\Delta'_s = 6,62 \text{ А/мм}^2$ ,  $\Delta''_s = 8,672 \text{ А/мм}^2$ .

3.1.8. Обмотковий крок  $y_w$  обирається виходячи з обмеження амплітуд 5 і 7 гармонік магніторушійної сили МРС статора,  $y_w = 5$  при полюсних поділах  $\tau'_z = Z_s / (2p') = 24/2 = 12$  і  $\tau''_z = Z_s / (2p'') = 24/4 = 6$ .

3.1.9. Обмоткові коефіцієнти  $(k'_{w1})''$ ,  $(k'_{w5})''$ ,  $(k'_{w7})''$  відповідно для 1, 5 і 7 гармонік МРС на двох швидкостях при обмеженнях  $(k'_{w5})' \leq 0,1$  і  $(k'_{w7})' \leq 0,2$ :

$$k'_{w1} = \frac{\sin[\pi/(2m)]}{q'_s \sin[\pi/(2mq'_s)]} \sin[\pi y / (2\tau'_z)] =$$

$$= \frac{\sin[\pi/(2 \cdot 3)]}{4 \sin[\pi/(2 \cdot 3 \cdot 4)]} \sin[\pi 5 / (2 \cdot 12)] = 0,583;$$

$$k'_{w5} = \frac{\sin[5\pi/(2m)]}{q'_s \sin[5\pi/(2mq'_s)]} \sin[5\pi y / (2\tau'_z)] =$$

$$= \frac{\sin[5\pi/(2 \cdot 3)]}{4 \sin[5\pi/(2 \cdot 3 \cdot 4)]} \sin[5\pi 5 / (2 \cdot 12)] = 0,02678 < 0,1;$$

$$k'_{w7} = \frac{\sin[7\pi/(2m)]}{q'_s \sin[7\pi/(2mq'_s)]} \sin[7\pi y / (2\tau'_z)] =$$

$$= \frac{\sin[7\pi/(2 \cdot 3)]}{4 \sin[7\pi/(2 \cdot 3 \cdot 4)]} \sin[7\pi 5 / (2 \cdot 12)] = 0,1562 < 0,2;$$

$$k''_{w1} = \frac{\sin[\pi/(2m)]}{q''_s \sin[\pi/(2mq''_s)]} \sin[\pi y / (2\tau''_z)] =$$

$$= \frac{\sin[\pi/(2 \cdot 3)]}{2 \sin[\pi/(2 \cdot 3 \cdot 2)]} \sin[\pi 5 / (2 \cdot 6)] = 0,933;$$

$$k''_{w5} = \frac{\sin[5\pi/(2m)]}{q''_s \sin[5\pi/(2mq''_s)]} \sin[5\pi y / (2\tau''_z)] =$$

$$= \frac{\sin[5\pi/(2 \cdot 3)]}{2 \sin[5\pi/(2 \cdot 3 \cdot 2)]} \sin[5\pi 5 / (2 \cdot 6)] = 0,067 < 0,1;$$

$$k''_{w7} = \frac{\sin[7\pi/(2m)]}{q''_s \sin[7\pi/(2mq''_s)]} \sin[7\pi y / (2\tau''_z)] =$$

$$= \frac{\sin[7\pi/(2 \cdot 3)]}{2 \sin[7\pi/(2 \cdot 3 \cdot 2)]} \sin[7\pi 5 / (2 \cdot 6)] = 0,08155 < 0,2.$$

Інші кроки обмотки забезпечують погіршені коефіцієнти  $k^{(')}_{5(7)}$  на одній з двох швидкостей.

3.1.10. Зовнішні діаметри активних поверхонь статора і ротора обмежені внутрішнім діаметром  $D_{\Pi}$  спеціального кулько-підшипника 5 – 1000823Л (ГОСТ 520 – 84) у внутрішню обійму якого вбудовано ротор,  $D_{\Pi} = 105$  мм. Зовнішній діаметр статора  $D_3$  і зовнішній діаметр ротора  $D_{3r}$  приймаються:  $D_3 = 120 \pm 0,5$  мм,  $D_{3r} = 121 \pm 0,5$  мм, де допуск на розмір 0,5 мм відповідає товщині стрічки сталі магнітопроводу.

3.1.11. Активна довжина  $l_{\delta}$ , зовнішній  $D_3$  та внутрішній  $D_B$  діаметри при середньому діаметрі магнітопроводу статора  $D = 9$  см:

$$l_{\delta} = \frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot (P')'}{D^2 n'_1 A' B'_{\delta} k'_{w1}} = \frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot (P')''}{D^2 n''_1 A'' B''_{\delta} k''_{w1}} =$$

$$= \frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot 0,439}{9^2 \cdot 3000 \cdot 149,3 \cdot 0,596 \cdot 0,583} = \frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot 0,284}{9^2 \cdot 1500 \cdot 196 \cdot 0,379 \cdot 0,933} = 3 \text{ см};$$

$$D_3 = l_{\delta} + D = 3 + 9 = 12 \text{ см};$$

$$D_B = D - l_{\delta} = 9 - 3 = 6 \text{ см},$$

де  $D$  – середній діаметр,  $D = 9$  см – відповідає проектному обмеженню  $D_3 = 12$  см.

3.1.12. Зубцевий крок на середньому діаметрі статора

$$t_s = \frac{\pi D}{Z_s} = \frac{\pi \cdot 9}{24} = 1,178 \text{ см.}$$

3.1.13. Кількість ефективних провідників  $U_{\Pi}$  на паз:

$$U_{\Pi} = A'_s t_s a'_s / I'_{1H} = A''_s t_s a''_s / I''_{1H} =$$

$$= 149,3 \cdot 1,178 \cdot 2 / 9,77 = 196 \cdot 1 / 6,4 = 36,$$

де  $a_s$  – кількість паралельних віток обмотки статора  $a'_s = 2$ ;  $a''_s = 1$ .

3.1.14. Площа  $S_{\Pi}$  та висота  $h_{\Pi s}$  пазу статора (рис. 3.1)

$$S_{\Pi} = U_{\Pi} n_{\text{ел}} S_{\text{ел}} / k_{3\Pi} = 36 \cdot 3 \cdot 0,246 / 0,33 = 80,5 \text{ мм}^2;$$

$$h'_{\Pi s} = S_{\Pi} / b_{\Pi s} = 80,5 / 4 = 20,125 \text{ мм},$$

де  $b_{\Pi s} = 4 \text{ мм} = 0,4 \text{ см}$  – ширина паза статора.

Приймається висота

$$h_{\text{ПС}} = h'_{\text{ПС}} + h''_{\text{ПС}} = 20,125 + 1,875 = 22 \text{ мм},$$

де  $h''_{\text{ПС}}$  – додаткова висота під клин та компаунд над обмоткою.

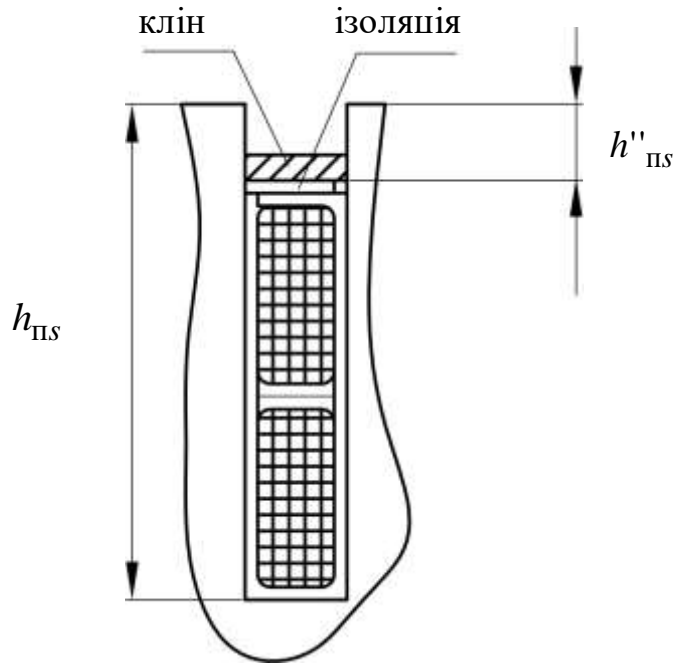


Рис. 3.1. Відкритий паз статора

3.1.15. Зубцевий шаг  $t_{\text{зсВ}}$  та ширина зубця  $b_{\text{зсВ}}$  на внутрішньому діаметрі при обмеженні  $b_{\text{зсВ}} \geq 0,2 \text{ см}$ :

$$t_{\text{зсВ}} = \pi D_{\text{В}} / Z_{\text{С}} = \pi \cdot 6 / 24 = 0,785 \text{ см};$$

$$b_{\text{зсВ}} = t_{\text{зсВ}} - b_{\text{ПС}} = 0,785 - 0,4 = 0,385 \text{ см} > 0,2 \text{ см}.$$

3.1.16. Кількість витків фази статора:

$$W'_s = p' q'_s U_{\text{П}} / a'_s = 1 \cdot 4 \cdot 36 / 2 = 72 ;$$

$$W''_s = p'' q''_s U_{\text{П}} / a''_s = 2 \cdot 2 \cdot 36 / 1 = 144 .$$

3.1.17. Ширина та індукція зубця на середньому діаметрі:

$$b_{\text{зс}} = t_s - b_{\text{ПС}} = 1,178 - 0,4 = 0,778 \text{ см};$$

$$B'_{\text{зс}} = \frac{B'_\delta t_s}{b_{\text{зс}} k_{\text{ЗМ}}} = \frac{0,59 \cdot 1,178}{0,778 \cdot 0,95} = 0,95 \text{ Тл}.$$

$$B''_{zs} = \frac{B''_{\delta} t_s}{b_{zs} k_{3M}} = \frac{0,379 \cdot 1,178}{0,778 \cdot 0,95} = 0,6 \text{ Тл.}$$

3.1.18. Магнітний потік:

$$\Phi'_{\delta} = B'_{\delta} D l_{\delta} \cdot 10^{-5} / p' = 0,596 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10^{-5} / 1 = 16,1 \cdot 10^{-5} \text{ Вб};$$

$$\Phi''_{\delta} = B''_{\delta} D l_{\delta} \cdot 10^{-5} / p'' = 0,379 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10^{-5} / 2 = 5,12 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

3.1.19. Висота  $h_{яс}$  і індукція  $B'_{яс}$  ярма статора:

$$h_{яс} = \frac{\Phi'_{\delta} \cdot 10^5}{2 k_{3M} l_{\delta} B'_{яс}} = \frac{\Phi'_{\delta} \cdot 10^5}{2 k_{3M} l_{\delta} B''_{яс}} = \frac{16,1 \cdot 10^{-5} \cdot 10^5}{2 \cdot 0,95 \cdot 3 \cdot 1,345} = \frac{5,12 \cdot 10^{-5} \cdot 10^5}{2 \cdot 0,95 \cdot 3 \cdot 0,428} =$$

$$= 2,1 \text{ см,}$$

де  $B'_{яс} = 1,345 \text{ Тл}$ ,  $B''_{яс} = 0,428 \text{ Тл}$  – індукція у ярмі на середньому діаметрі.

3.1.20. Робочий зазор  $\delta$  та кількість пазів  $Z_R$  ротора:

$$\delta = 0,04 \text{ см; } Z_R = 18.$$

3.1.21. Струм стрижня у робочому режимі:

$$I'_R = [2W'_s k'_{wl} P'_2 / (U_1 Z_R)] \cdot [(0,2 + 0,8 \cos \varphi') \cdot 10^3 / (\eta' \cos \varphi')] =$$

$$= \frac{2 \cdot 72 \cdot 0,583 \cdot 0,25}{15,588 \cdot 18} \cdot \frac{(0,2 + 0,8 \cdot 0,76) \cdot 10^3}{0,72 \cdot 0,76} = 110,45 \text{ А.}$$

$$I''_R = [2W''_s k''_{wl} P''_2 / (U_1 Z_R)] \cdot [(0,2 + 0,8 \cos \varphi'') \cdot 10^3 / (\eta'' \cos \varphi'')] =$$

$$= \frac{2 \cdot 144 \cdot 0,933 \cdot 0,14}{15,588 \cdot 18} \cdot \frac{(0,2 + 0,8 \cdot 0,72) \cdot 10^3}{0,63 \cdot 0,72} = 229,24 \text{ А.}$$

3.1.22. Коефіцієнт приведення струму короткозамикаючого кільця (КЗК):

$$k'_{пр} = 2 \sin(\pi p' / Z_R) = 2 \sin(\pi \cdot 1 / 18) = 0,3473 ;$$

$$k''_{пр} = 2 \sin(\pi p'' / Z_R) = 2 \sin(\pi \cdot 2 / 18) = 0,684 .$$

3.1.23. Струм КЗК:

$$I'_{КЗК} = I'_R / k'_{пр} = 110,45 / 0,3473 = 318 \text{ А;}$$

$$I''_{КЗК} = I''_R / k''_{пр} = 229,24 / 0,684 = 335,15 \text{ А.}$$

3.1.24. Значення перетину стрижня

$$S_c = I'_R / \Delta'_R = I''_R / \Delta''_R = 110,45 / 2,12 = 229,24 / 4,4 = 42 \text{ мм}^2,$$

де  $\Delta'_R = 2,12 \text{ А/мм}^2$ ,  $\Delta''_R = 4,4 \text{ А/мм}^2$  – густина струму стрижня на двох швидкостях роботи.

3.1.25. Значення зовнішнього  $S'_{\text{КЗ}}$  та внутрішнього  $S''_{\text{КВ}}$  перетину КЗК:

$$S'_{\text{КЗ}} = I'_{\text{КЗК}} / \Delta'_{\text{КЗ}} = I''_{\text{КЗК}} / \Delta''_{\text{КЗ}} = 318 / 2,12 = 335,15 / 2,23 = 150 \text{ мм}^2;$$

$$S''_{\text{КВ}} = I'_{\text{КЗК}} / \Delta'_{\text{КВ}} = I''_{\text{КЗК}} / \Delta''_{\text{КВ}} = 318 / 0,994 = 335,15 / 1,05 = 320 \text{ мм}^2,$$

де  $\Delta'_{\text{КЗ}} = 2,12 \text{ А/мм}^2$ ,  $\Delta''_{\text{КЗ}} = 2,23 \text{ А/мм}^2$  – густина струму зовнішнього КЗК;  $\Delta'_{\text{КВ}} = 0,994 \text{ А/мм}^2$ ,  $\Delta''_{\text{КВ}} = 1,05 \text{ А/мм}^2$  – густина струму внутрішнього КЗК.

3.1.26. Висота зубця  $h_{\text{ZR}}$  та ширина прорізі  $b_{\text{пр}}$  (дна) паза (рис. 3.2, а і б) ротора приймаються рівними:

$$h_{\text{ZR}} = 1,4 \text{ см}; b_{\text{пр}} = 0,2 \text{ см}.$$

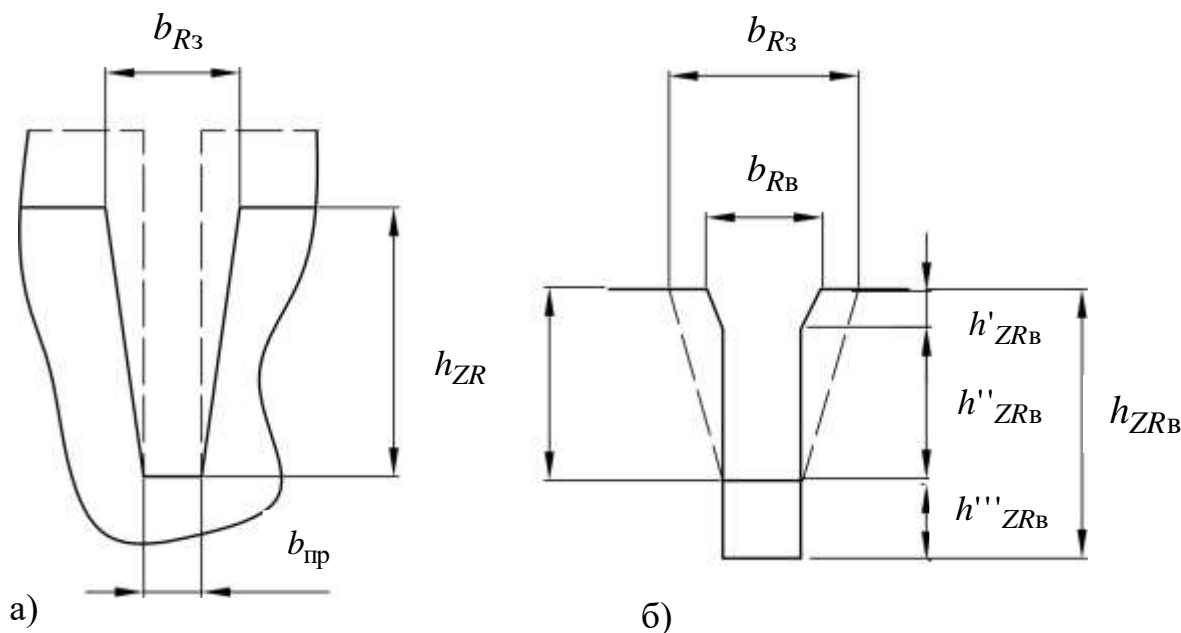


Рис. 3.2. Геометричні співвідношення паза (а, б) ротора

3.1.27. Зовнішні діаметри магнітопровода  $D_{R3}$  та ярма  $D_{\text{яR3}}$  ротора:

$$D_{R3} = D_3 + 0,1 = 12 + 0,1 = 12,1 \text{ см};$$

$$D_{\text{яR3}} = D_{R3} - 2h_{\text{ZR}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{KR}} = 12,1 - 2 \cdot 1,4 \cdot \operatorname{tg} 40^\circ = 10,1 - 2,8 \cdot 0,839 = 9,75 \text{ см},$$

де  $\alpha_{\text{KR}}$  – кут конусності зубцевої зони  $\alpha_{\text{KR}} = 40^\circ$ .

3.1.28. Ширина пазу ротора на зовнішньому діаметрі

$$b_{R3} = \frac{\pi}{Z_R} (D_{R3} - D_{яR3}) + b_{пр} = \frac{\pi}{18} (12,1 - 9,75) + 0,2 = 0,61 \text{ см.}$$

3.1.29. Площа перетину пазу ротора:

$$S_{пR} = \frac{b_{R3} + b_{пр}}{2} h_{ZR} = \frac{6,1 + 2}{2} \cdot 14 = 56,7 \text{ мм}^2.$$

Вказана площа за вичетом площі, що займає феромагнітна вставка (клин), відповідає площі стрижня  $S_c = 52 \text{ мм}^2$ .

3.1.30. Внутрішній діаметр  $D_{RB}$  активної поверхні та зменшення внутрішнього діаметра  $\Delta D_{яR}$  ярма відносно  $D_{RB}$ :

$$D_{RB} = D_B - 0,1 = 6 - 0,1 = 5,9 \text{ см};$$

$$\Delta D_{яR} = \frac{h_{ZR} - 0,5(D_{яR3} - D_{RB}) \operatorname{tg}(\alpha_{кR}/2)}{\operatorname{ctg}\alpha_{кR} + \operatorname{tg}(\alpha_{кR}/2)} =$$

$$= \frac{1,4 - 0,5(9,75 - 5,9) \operatorname{tg}(40^\circ/2)}{\operatorname{ctg}40^\circ + \operatorname{tg}(40^\circ/2)} = 0,45 \text{ см.}$$

3.1.31. Внутрішній діаметр ярма ротора

$$D_{яRB} = D_{RB} - 2\Delta D_{яR} = 5,9 - 2 \cdot 0,45 = 5 \text{ см.}$$

3.1.32. Ширина пазу ротора на внутрішньому діаметрі

$$b_{RB} = \frac{\pi}{Z_R} (D_{RB} - D_{яRB}) + b_{пр} = \frac{\pi}{18} (5,9 - 5) + 0,2 = 0,357 \text{ см.}$$

3.1.33. Складові  $h'_{ZR}$  і  $h''_{ZR}$  висоти паза ротора на внутрішньому діаметрі:

$$h'_{ZR} = \Delta D_{яR} \operatorname{ctg}\alpha_{кR} = 0,45 \operatorname{ctg}40^\circ = 0,5363 \text{ см};$$

$$h''_{ZR} = h_{ZR} - h'_{ZR} = 1,4 - 0,5363 = 0,864 \text{ см.}$$

3.1.34. Висота прорізи у заготівлі магнітопроводу ротора на зовнішньому діаметрі

$$h_{3R} = h_{ZR} / \cos \alpha_{кR} = 1,4 / \cos 40^\circ = 1,83 \text{ см.}$$

3.1.35. Складові площі пазу на висоті  $h'_{ZR}$

$$S'_{пRB} = \frac{b_{RB} + b_{пр}}{2} h'_{ZR} = \frac{0,357 + 0,2}{2} \cdot 0,5363 = 0,149 \text{ см}^2.$$

3.1.36. Сума висот прямокутної частини пазу на внутрішньому діаметрі



$$h''_{ZR} + h'''_{ZR} = (S_{\Pi R} - S'_{\Pi RB}) / b_{\Pi R} = (0,567 - 0,149) / 0,2 = 2,09 \text{ см.}$$

3.1.37. Висота пазу ротора на внутрішньому діаметрі

$$h_{ZR\text{B}} = h'_{ZR} + h''_{ZR} + h'''_{ZR} = 0,5363 + 2,09 = 2,626 \text{ см.}$$

3.1.38. Довжина ярма ротора

$$l_{яR} = \frac{D_{яR3} - D_{яRB}}{2} = \frac{9,75 - 5}{2} = 2,375 \text{ см.}$$

3.1.39. Складова висоти паза

$$h'''_{ZR} = h_{ZR\text{B}} - h_{ZR} = 2,626 - 1,4 = 1,226 \text{ см.}$$

3.1.40. Кут похилу дна пазу ротора

$$\alpha_{\Pi R} = \arctg(h'''_{ZR} / l_{яR}) = \arctg(1,226 / 2,375) = 32^\circ.$$

3.1.41. Висота ярма ротора на середньому діаметрі ярма

$$h_{яR} = \frac{\Phi'_\delta \cdot 10^5}{2k_{3M} l_{яR} B'_{яR}} = \frac{\Phi''_\delta \cdot 10^5}{2k_{3M} l_{яR} B''_{яR}} = \frac{16,1 \cdot 10^{-5} \cdot 10^5}{2 \cdot 0,95 \cdot 2,375 \cdot 1,49} =$$

$$= \frac{5,12 \cdot 10^{-5} \cdot 10^5}{2 \cdot 0,95 \cdot 2,375 \cdot 0,473} = 2,4 \text{ см,}$$

де  $B'_{яR} = 1,49 \text{ Тл}$ ,  $B''_{яR} = 0,473 \text{ Тл}$  – значення індукції на середньому діаметрі ярма на двох швидкостях обертання.

3.1.42. Висота ярма ротора на зовнішньому діаметрі

$$h_{яR3} = h_{яR} + l_{яR} \operatorname{tg}(\alpha_{\Pi R}) / 2 = 2,2 + 2,375 \cdot \operatorname{tg}(32^\circ) / 2 = 2,942 \text{ см.}$$

3.1.43. Зовнішня ширина  $b_{R3c}$  та ширина відкриття  $b_{\Pi R}$  паза ротора на середньому діаметрі:

$$b_{R3c} = (b_{R3} + b_{RB}) / 2 = (0,61 + 0,357) / 2 = 0,484 \text{ см;}$$

$$b_{\Pi R} = b_{R3c} - b_{\text{кл}} = 0,484 - 0,35 = 0,134 \text{ см,}$$

де  $b_{\text{кл}}$  – ширина феромагнітного клина пазу ротора (рис. 3.2, а),  $b_{\text{кл}} = 0,35 \text{ см}$ .

3.1.44. Висота зубця ротора на середньому діаметрі

$$h_{zRc} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta D_{яR}}{\sin \alpha_{KR}} + \frac{h_{zR}}{\cos \alpha_{KR}} + l_{яR} \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha_{KR}}{2} + \operatorname{tg} \alpha_{\Pi R} \right) \right] =$$

$$= \frac{1}{2} \left[ \frac{0,45}{\sin 40^\circ} + \frac{1,4}{\cos 40^\circ} + 2,375 \left( \operatorname{tg} \frac{40^\circ}{2} + \operatorname{tg} 32^\circ \right) \right] = 2,44 \text{ см.}$$

3.1.45. Зубцевий крок заготівлі магнітопроводу та ширина зубця на середньому діаметрі:

$$t_{3R} = \frac{\pi(D_{яR3} + D_{яRB})}{2Z_R} = \frac{\pi(9,75 + 5)}{2 \cdot 18} = 1,29 \text{ см};$$

$$b_{zR} = t_{3R} - b_{\text{пр}} = 1,29 - 0,2 = 1,09 \text{ см}.$$

3.1.46. Зубцевий крок та індукція у зубцях ротора на середньому діаметрі:

$$t_R = \frac{\pi D}{Z_R} = \frac{\pi \cdot 9}{18} = 1,57 \text{ см};$$

$$B'_{zR} = \frac{B'_\delta t_R l_\delta}{b_{ZR} k_{3M} l_{\delta R}} = \frac{0,596 \cdot 1,57 \cdot 3}{1,09 \cdot 0,95 \cdot 3,1} = 0,875 \text{ Тл};$$

$$B''_{zR} = \frac{B''_\delta t_R l_\delta}{b_{ZR} k_{3M} l_{\delta R}} = \frac{0,379 \cdot 1,57 \cdot 3}{1,09 \cdot 0,95 \cdot 3,1} = 0,57 \text{ Тл}.$$

## 3.2. Розрахунок магнітного кола та втрат неробочого руху

3.2.1. Допоміжні коефіцієнти розрахунку коефіцієнта робочого зазору:

$$\gamma_s = \frac{(b_{\text{мс}}/\delta)^2}{5 + b_{\text{мс}}/\delta} = \frac{(0,4/0,04)^2}{5 + 0,4/0,04} = 6,67 ;$$

$$\gamma_R = \frac{(b_{\text{мR}}/\delta)^2}{5 + b_{\text{мR}}/\delta} = \frac{(0,134/0,04)^2}{5 + 0,134/0,04} = 1,344 .$$

3.2.2. Коефіцієнт робочого зазору

$$k_\delta = \frac{t_s t_R}{(t_s - \gamma_s \delta)(t_R - \gamma_R \delta)} = \frac{1,178 \cdot 1,57}{(1,178 - 6,67 \cdot 0,04)(1,57 - 1,344 \cdot 0,04)} = 1,341 .$$

3.2.3. Магнітна напруга робочого зазору:

$$F'_\delta = 1,6 k_\delta \delta B'_\delta \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 1,341 \cdot 0,04 \cdot 0,596 \cdot 10^4 = 512 \text{ А};$$

$$F''_\delta = 1,6 k_\delta \delta B''_\delta \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 1,341 \cdot 0,04 \cdot 0,379 \cdot 10^4 = 325 \text{ А}.$$

3.2.4. Магнітна напруга зубців статора:

$$F'_{ZS} = 2 h_{ZS} H'_{ZS} = 2 \cdot 2,2 \cdot 1,38 = 6,12 \text{ А};$$

$$F''_{ZS} = 2 h_{ZRC} H''_{ZS} = 2 \cdot 2,2 \cdot 0,95 = 4,18 \text{ А},$$

де для зубців зі сталі 2013 при  $B'_{ZS}=0,95$  Тл і  $B''_{ZS}=0,6$  Тл,  $H'_{ZS}=1,38$  А/см і  $H''_{ZS}=0,95$  А/см.

### 3.2.5. Магнітна напруга зубців ротора

$$F'_{ZR} = 2h_{ZRC}H'_{ZR} = 2 \cdot 2,44 \cdot 1,17 = 5,71 \text{ А};$$

$$F''_{ZR} = 2h_{ZRC}H''_{ZR} = 2 \cdot 2,44 \cdot 1,01 = 4,93 \text{ А},$$

де при  $B'_{ZR}=0,875$  Тл і  $B''_{ZR}=0,57$  Тл,  $H'_{ZR}=1,17$  А/см і  $H''_{ZR}=1,01$  А/см.

### 3.2.6. Довжина середньої силової лінії поля у ярмі статора

$$l'_{яS} = \frac{\pi(D + h_{яS})}{2p'} = \frac{\pi(9 + 2,1)}{2} = 17,44 \text{ см};$$

$$l''_{яS} = \frac{\pi(D + h_{яS})}{2p''} = \frac{\pi(9 + 2,1)}{4} = 8,718 \text{ см.}$$

### 3.2.7. Магнітна напруга ярма статора

$$F'_{яS} = H'_{яS} l'_{яS} = 4,65 \cdot 17,44 = 81,1 \text{ А};$$

$$F''_{яS} = H''_{яS} l''_{яS} = 0,805 \cdot 8,718 = 7,02 \text{ А};$$

де для  $B'_{яS}=1,345$  Тл і  $B''_{яS}=0,428$  Тл в ярмі зі сталі 2013,  $H'_{яS}=4,65$  А/см і  $H''_{яS}=0,805$  А/см.

### 3.2.8. Довжина середньої силової лінії поля у ярмі ротора

$$l'_{яR} = \frac{\pi[0,5(D_{яR3} + D_{яR6}) + h_{яR}]}{2p'} = \frac{\pi[0,5(9,75 + 5) + 2,4]}{2} = 15,35 \text{ см};$$

$$l''_{яR} = \frac{\pi[0,5(D_{яR3} + D_{яR6}) + h_{яR}]}{2p''} = \frac{\pi[0,5(9,75 + 5) + 2,4]}{4} = 7,68 \text{ см.}$$

### 3.2.9. Магнітна напруга ярма ротора:

$$F'_{яR} = H'_{яR} l'_{яR} = 10,8 \cdot 15,35 = 165,78 \text{ А};$$

$$F''_{яR} = H''_{яR} l''_{яR} = 0,85 \cdot 7,68 = 6,53 \text{ А.}$$

де для  $B'_{яR}=1,49$  Тл і  $B''_{яR}=0,473$  Тл,  $H'_{яR}=10,8$  А/см і  $H''_{яR}=0,85$  А/см.

### 3.2.10. Магніторушійна сила магнітного кола

$$F'_{\Sigma} = F'_{\delta} + F'_{ZS} + F'_{ZR} + F'_{яS} + F'_{яR} = 512 + 6,12 + 5,71 + 81,1 + 165,78 = 770,71 \text{ А.}$$

$$F''_{\Sigma} = F''_{\delta} + F''_{ZS} + F''_{ZR} + F''_{яS} + F''_{яR} = 325 + 4,18 + 4,93 + 7,02 + 6,53 = 347,66 \text{ А.}$$

3.2.11. Коефіцієнт насичення магнітного кола та намагнічувальний струм:

$$k'_{\mu} = \frac{F'_{\Sigma}}{F'_{\delta}} = \frac{770,71}{512} = 1,5;$$

$$k''_{\mu} = \frac{F''_{\Sigma}}{F''_{\delta}} = \frac{347,66}{325} = 1,07;$$

$$I'_{\mu} = \frac{p' F'_{\Sigma}}{0,9 m w'_s k'_{ws}} = \frac{1 \cdot 770,71}{0,9 \cdot 3 \cdot 72 \cdot 0,583} = 6,8 \text{ A};$$

$$I''_{\mu} = \frac{p'' F''_{\Sigma}}{0,9 m w''_s k''_{ws}} = \frac{2 \cdot 347,66}{0,9 \cdot 3 \cdot 144 \cdot 0,933} = 1,917 \text{ A};$$

$$I'_{\mu\%} = 100 \frac{I'_{\mu}}{I'_{H1}} = 100 \cdot \frac{6,8}{9,77} = 69,6\%;$$

$$I''_{\mu\%} = 100 \frac{I''_{\mu}}{I''_{H1}} = 100 \cdot \frac{1,917}{6,4} = 30\%.$$

3.2.12. Маса ярма статора

$$G_{\text{яс}} = \gamma_{\text{ст}} \pi h_{\text{яс}} D l_{\delta} \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot \pi \cdot 2,1 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 1,39 \text{ кг},$$

де  $\gamma_{\text{ст}} = 7,8 \text{ г/см}^3$  – густина електротехнічної сталі.

3.2.13. Маса зубців статора, що відповідає головним утратам

$$G_{\text{зsy}} = \gamma_{\text{ст}} Z_1 b_{\text{zs}} l_{\delta} h_{\text{zs}} k_{\text{зм}} \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 24 \cdot 0,778 \cdot 3 \cdot 2,2 \cdot 0,95 = 0,913 \text{ кг},$$

де  $h_{\text{zs}}$  – висота зубця статора,  $h_{\text{zs}} = h_{\text{пс}}$ .

3.2.14. Головні утрати у сталі ярма статора:

$$P'_{\text{сяс}} = 4,4 B'^2_{\text{яс}} G_{\text{яс}} = 4,4 \cdot 1,345^2 \cdot 1,39 = 11,064 \text{ Вт};$$

$$P''_{\text{сяс}} = 4,4 B''^2_{\text{яс}} G_{\text{яс}} = 4,4 \cdot 0,428^2 \cdot 1,39 = 1,12 \text{ Вт}.$$

3.2.15. Головні утрати у сталі зубців статора:

$$P'_{\text{сзс}} = 4,4 B'^2_{\text{зс}} G_{\text{зsy}} = 4,4 \cdot 0,95^2 \cdot 0,913 = 3,63 \text{ Вт};$$

$$P'_{\text{сзс}} = 4,4 B'^2_{\text{зс}} G_{\text{зsy}} = 4,4 \cdot 0,6^2 \cdot 0,913 = 1,45 \text{ Вт}.$$

3.2.16. Повні утрати у сталі зубців:

$$P'_{\text{зс}} = P'_{\text{сзс}} \left[ 1 + 2(k_{\delta} - 1) \sqrt{t_s} \right] = 3,63 \left[ 1 + 2(1,341 - 1) \sqrt{1,178} \right] = 6,316 \text{ Вт};$$

$$P''_{z\Sigma} = P''_{c\Sigma} \left[ 1 + 2(k_{\delta} - 1)\sqrt{t_s} \right] = 1,45 \left[ 1 + 2(1,341 - 1)\sqrt{1,178} \right] = 2,52 \text{ Вт.}$$

3.2.17. Утрати у сталі

$$P'_{c\Sigma} = P'_{c\text{яс}} + P'_{z\Sigma} = 11,064 + 6,316 = 17,38 \text{ Вт};$$

$$P''_{c\Sigma} = P''_{c\text{яс}} + P''_{z\Sigma} = 1,12 + 2,52 = 3,64 \text{ Вт};$$

3.2.18. Механічні утрати двигуна

$$P'_{\text{мех}} \approx 0,65 \left( \frac{n'}{1000} \right)^2 (D_R/10)^4 = 0,65 \cdot \left( \frac{3000}{1000} \right)^2 (12,1/10)^4 = 12,54 \text{ Вт};$$

$$P''_{\text{мех}} \approx 0,65 \left( \frac{n''}{1000} \right)^2 (D_R/10)^4 = 0,65 \cdot \left( \frac{1500}{1000} \right)^2 (12,1/10)^4 = 3,135 \text{ Вт.}$$

### 3.3. Розрахунок параметрів і характеристик

3.3.1. Середній зубцевий поділ та ширина котушки обмотки статора на зовнішньому та внутрішньому діаметрах магнітопровода:

$$t_{s3} = \pi D_3 / Z_s = \pi \cdot 12 / 24 = 1,57 \text{ см};$$

$$t_{sB} = \pi D_B / Z_s = \pi \cdot 6 / 24 = 0,785 \text{ см};$$

$$b_{срз} = y_w t_{s3} = 5 \cdot 1,57 = 7,85 \text{ см};$$

$$b_{срв} = y_w t_{sB} = 5 \cdot 0,785 = 3,925 \text{ см.}$$

3.3.2. Середня довжина зовнішньої та внутрішньої лобових частин статора:

$$l_{лз} = (1,16 + 0,14 p') b_{срз} + 1,5 = (1,16 + 0,14 \cdot 1) \cdot 7,85 + 1,5 = 11,705 \text{ см};$$

$$l_{лв} = (1,16 + 0,14 p') b_{срв} + 1,5 = (1,16 + 0,14 \cdot 1) \cdot 3,925 + 1,5 = 6,6 \text{ см.}$$

3.3.3. Середня довжина витка обмотки та довжина вильоту на зовнішньому і внутрішньому діаметрах статора:

$$l_{wср} = 2l_{\delta} + l_{лз} + l_{лв} = 2 \cdot 3 + 11,705 + 6,6 = 24,3 \text{ см};$$

$$l_{всз} = k_B (0,19 + 0,1 p') b_{срз} + 1 = 0,7 \cdot (0,19 + 0,1 \cdot 1) \cdot 7,85 + 1 = 2,6 \text{ см};$$

$$l_{всв} = k_B (0,19 + 0,1 p') b_{срв} + 1 = 0,7 \cdot (0,19 + 0,1 \cdot 1) \cdot 3,925 + 1 = 1,8 \text{ см},$$

де  $k_B = 0,7$  – коефіцієнт вигину лобової частини.

3.3.4. Довжина проводу фази статора:

$$L'_{w1} = w'_s l_{wcp} \cdot 10^{-2} = 78 \cdot 24,3 \cdot 10^{-2} = 17,5 \text{ м};$$

$$L''_{w1} = w''_s l_{wcp} \cdot 10^{-2} = 144 \cdot 24,3 \cdot 10^{-2} = 35 \text{ м}.$$

3.3.5. Активний опір обмотки статора:

$$R'_1 = \rho_{Cu75} \frac{L'_{w1}}{n_{el} S_{el} a'_s} = \frac{17,5}{46 \cdot 3 \cdot 0,246 \cdot 2} = 0,258 \text{ Ом};$$

$$R''_1 = \rho_{Cu75} \frac{L''_{w1}}{n_{el} S_{el} a''_s} = \frac{35}{46 \cdot 3 \cdot 0,246 \cdot 1} = 1,031 \text{ Ом};$$

$$R'^*_1 = \frac{I'_{1H} R'_1}{U_1} = \frac{9,77 \cdot 0,258}{15,588} = 0,162;$$

$$R''^*_1 = \frac{I''_{1H} R''_1}{U_1} = \frac{6,4 \cdot 1,031}{15,588} = 0,423,$$

де  $\rho_{Cu75} = 1/46 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  - питомий опір електротехнічної міді при  $75^\circ\text{C}$ .

3.3.6. Опір стрижня ротора

$$R_c = \rho_{Al75} \cdot 10^{-2} \frac{l_{\delta R} + l_{яR}}{2S_c} = \frac{10^{-2}}{23} \cdot \frac{3,1 + 2,375}{2 \cdot 52} = 0,229 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

де  $\rho_{Al75} = 1/23 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  – питомий опір електротехнічного алюмінію при  $75^\circ\text{C}$ .

3.3.7. Опори зовнішнього та внутрішнього коротко замикаючих кілець:

$$R_{кзкз} = \rho_{Al75} \frac{\pi D_{кзкз} \cdot 10^{-2}}{Z_R S_{кз}} = \frac{1}{23} \cdot \frac{\pi \cdot 10,6 \cdot 10^{-2}}{18 \cdot 150} = 0,536 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$R_{кзкв} = \rho_{Al75} \frac{\pi D_{кзкв} \cdot 10^{-2}}{Z_R S_{кв}} = \frac{1}{23} \cdot \frac{\pi \cdot 4,6 \cdot 10^{-2}}{18 \cdot 320} = 0,854 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

де  $D_{кзкз(в)} = 9(2,5) \text{ см}$  - усереднений діаметр зовнішнього (внутрішнього) кільця.

3.3.8. Активний опір обмотки ротора:

$$R'_2 = R_c + \frac{R_{кзкз} + R_{кзкв}}{[2 \sin(\pi p' / Z_R)]^2} = 0,229 \cdot 10^{-4} + \frac{(0,536 + 0,0854) \cdot 10^{-5}}{[2 \sin(\pi \cdot 1/18)]^2} =$$

$$= 0,744 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$R''_2 = R_c + \frac{R_{K3K3} + R_{K3KB}}{[2 \sin(\pi p''/Z_R)]^2} = 0,229 \cdot 10^{-4} + \frac{(0,536 + 0,0854) \cdot 10^{-5}}{[2 \sin(\pi \cdot 2/18)]^2} =$$

$$= 0,32 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

3.3.9. Коефіцієнт приведення параметрів білячої клітки:

$$v'_{\text{пк}} = \frac{4m_1(w'_s k'_{w1})^2}{Z_R} = \frac{4 \cdot 3(72 \cdot 0,583)^2}{18} = 1174,66;$$

$$v''_{\text{пк}} = \frac{4m_1(w''_s k''_{w1})^2}{Z_R} = \frac{4 \cdot 3(144 \cdot 0,933)^2}{18} = 12033,64.$$

3.3.10 Приведений активний опір ротора:

$$(R'_{2\pi})' = R'_2 v'_{\text{пк}} = 0,744 \cdot 10^{-4} \cdot 1174,66 = 0,0874 \text{ Ом;}$$

$$(R'_{2\pi})'' = R''_2 v''_{\text{пк}} = 0,32 \cdot 10^{-4} \cdot 12033,64 = 0,385 \text{ Ом;}$$

$$(R'_{2\pi})^* = \frac{I'_{1\pi} (R'_{2\pi})'}{U_1} = \frac{9,77 \cdot 0,0874}{15,588} = 0,0548;$$

$$(R'_{2\pi})^{*''} = \frac{I''_{1\pi} (R'_{2\pi})''}{U_1} = \frac{6,4 \cdot 0,385}{15,588} = 0,158.$$

3.3.11. Коефіцієнти впливу кроку обмотки на пазове розсіювання:

$$(k'_{\beta})' = \frac{6(y/\tau') - 1}{4} = \frac{6(5/12) - 1}{4} = 0,375;$$

$$(k'_{\beta})'' = \frac{1 + 3y/\tau''}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 5/6}{4} = 0,875;$$

$$(k_{\beta})' = \frac{1}{4} + \frac{3}{4}(k'_{\beta})' = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cdot 0,375 = 0,53125;$$

$$(k_{\beta})'' = \frac{1}{4} + \frac{3}{4}(k'_{\beta})'' = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cdot 0,875 = 0,90635.$$

3.3.12. Коефіцієнти провідності пазового розсіювання статора:

$$\lambda'_{\text{пс}} = \frac{h_1 - h_4}{3b_{\pi}} (k_{\beta})' + \frac{h'_2}{b_{\pi}} (k'_{\beta})' + \frac{h_4}{4b_{\pi}} =$$

$$= \frac{2,02 - 0,024}{3 \cdot 0,4} \cdot 0,53125 + \frac{0,18}{0,4} \cdot 0,375 + \frac{0,024}{4 \cdot 0,4} = 1,06735;$$

$$\lambda''_{\text{пс}} = \frac{h_1 - h_4}{3b_{\text{п}}} (k_{\beta})'' + \frac{h'_2}{b_{\text{п}}} (k'_{\beta})'' + \frac{h_4}{4b_{\text{п}}} =$$

$$= \frac{2,02 - 0,024}{3 \cdot 0,4} \cdot 0,90625 + \frac{0,18}{0,4} \cdot 0,875 + \frac{0,024}{4 \cdot 0,4} = 1,916.$$

3.3.13. Коефіцієнт впливу шлиця  $k_{\text{шс}}$  та демпфірування розсіювання статора  $\lambda_{\text{дс}}$  і  $\sigma_{\text{дс}}$ :

$$k_{\text{шс}} = 1 - 0,033b_{\text{шс}}^2 / (t_s \delta) = 1 - 0,033 \cdot 0,4^2 / (1,178 \cdot 0,04) = 0,888;$$

$$\rho'_{\text{дс}} = 0,79; \rho''_{\text{дс}} = 0,95;$$

$$\sigma'_{\text{дс}} = 0,0102; \sigma''_{\text{дс}} = 0,06.$$

3.3.14. Коефіцієнт провідності диференціального розсіювання статора:

$$\lambda'_{\text{дс}} = 0,9t_s (q'_s k'_{w1})^2 \rho'_{\text{дс}} k_{\text{шс}} \sigma'_{\text{дс}} / (\delta k_{\delta}) =$$

$$= 0,9 \cdot 0,178 \cdot (4 \cdot 0,583)^2 0,79 \cdot 0,888 \cdot 0,0102 / (0,04 \cdot 1,341) = 0,769.$$

$$\lambda''_{\text{дс}} = 0,9t_s (q''_s k''_{w1})^2 \rho''_{\text{дс}} k_{\text{шс}} \sigma''_{\text{дс}} / (\delta k_{\delta}) =$$

$$= 0,9 \cdot 1,178 \cdot (2 \cdot 0,933)^2 0,95 \cdot 0,888 \cdot 0,06 / (0,04 \cdot 1,341) = 3,483.$$

3.3.15. Поліска поділка та коефіцієнт провідності лобового розсіювання статора

$$\tau' = \pi D / 2p' = \pi \cdot 9 / 2 = 14,137 \text{ см};$$

$$\tau'' = \pi D / 2p'' = \pi \cdot 9 / 4 = 7,0686 \text{ см};$$

$$\lambda'_{\text{лс}} = 0,34q'_s (l_{\text{лс}} - 0,64\tau' y_s / y) / l_{\delta} =$$

$$= 0,34 \cdot 4(9,15 - 0,64 \cdot 14,137 \cdot 5/12) / 3 = 2,439;$$

$$\lambda''_{\text{лс}} = 0,34q''_s (l_{\text{лс}} - 0,64\tau'' y_s / y) / l_{\delta} =$$

$$= 0,34 \cdot 2(9,15 - 0,64 \cdot 7,0686 \cdot 5/6) / 3 = 1,219,$$

$$\text{де } l_{\text{лс}} = (l_{\text{лз}} + l_{\text{лв}}) / 2 = (11,705 + 6,6) / 2 = 9,15 \text{ см}.$$

3.3.16. Сумарна провідність розсіювання статора:

$$\lambda'_{s\Sigma} = \lambda'_{\text{пс}} + \lambda'_{\text{дс}} + \lambda'_{\text{лс}} = 1,06735 + 0,769 + 2,439 = 4,275;$$

$$\lambda''_{s\Sigma} = \lambda''_{\text{пс}} + \lambda''_{\text{дс}} + \lambda''_{\text{лс}} = 1,916 + 3,483 + 1,219 = 6,618.$$

3.3.17. Індуктивний опір розсіювання статора:



$$x'_1 = 0,158 \frac{f_1}{100} \left( \frac{w'_s}{100} \right)^2 \frac{l_\delta}{p' q'_s} \lambda'_{s\Sigma} = 0,158 \frac{50}{100} \left( \frac{72}{100} \right)^2 \frac{3}{1 \cdot 4} \cdot 4,275 = 0,131 \text{ Ом};$$

$$x''_1 = 0,158 \frac{f_1}{100} \left( \frac{w''_s}{100} \right)^2 \frac{l_\delta}{p'' q''_s} \lambda''_{s\Sigma} = 0,158 \frac{50}{100} \left( \frac{144}{100} \right)^2 \frac{3}{2 \cdot 2} \cdot 6,618 = 0,813 \text{ Ом}.$$

3.3.18. Коефіцієнт провідності пазового розсіювання ротора

$$\lambda_{\Pi R} = \frac{h'_{ZR}}{1,5(b_{RB} + b_{R3})} + \frac{2h'''_{ZR} + h''_{ZR}}{6b_{\Pi R}} + \frac{h_{\Pi R}}{b_{\Pi R}} =$$

$$= \frac{0,5363}{1,5(0,357 + 0,61)} + \frac{2 \cdot 1,226 + 0,864}{6 \cdot 0,2} + \frac{0,1}{0,1335} = 3,882 ,$$

де  $h_{\Pi R}$  і  $b_{\Pi R}$  – висота і ширина шлиця ротора,

$$h_{\Pi R} = 0,1 \text{ см}; \quad b_{\Pi R} = [(b_{RB} + b_{R3})/2] - b_{\text{кл}} = [(0,357 + 0,61)/2] - 0,35 = 0,133 \text{ см}.$$

3.3.19. кількість пазів на полюс і фазу ротора  $q^{('')}_{R}$  та коефіцієнт демпфірування  $\sigma^{('')}_{dR}$  розсіювання ротора:

$$q'_R = \frac{Z_R}{2p'm} = \frac{18}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 3;$$

$$q''_R = \frac{Z_R}{2p''m} = \frac{18}{4 \cdot 3} = 1,5;$$

$$\sigma'_{dR} = 0,0102; \quad \sigma''_{dR} = 0,06.$$

3.3.20. Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання ротора:

$$\lambda'_{dR} = 0,9 t_R q'_R \sigma'_{dR} / (\delta k_\delta) =$$

$$= 0,9 \cdot 1,57 \cdot 3 \cdot 0,0102 / (0,04 \cdot 1,341) = 0,806 ;$$

$$\lambda''_{dR} = 0,9 t_R q''_R \sigma''_{dR} / (\delta k_\delta) = 0,9 \cdot 1,57 \cdot 1,5 \cdot 0,06 / (0,04 \cdot 1,341) = 2,37 .$$

3.3.21. Коефіцієнт провідності лобового розсіювання ротора:

$$\lambda'_{dR3} = \frac{2,3 D_{\text{кзкз}}}{Z_R l_{\delta R} [2 \sin(\pi p' / Z_R)]^2} \lg \left( \frac{2,35 D_{\text{кзкз}}}{h_{\text{кз}} + b_{\text{кз}}} \right) =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 10,6}{18 \cdot 3,1 \cdot [2 \sin(\pi 1/18)]^2} \lg \left( \frac{2,35 \cdot 10,6}{0,8 + 2,2} \right) = 3,33 ;$$

$$\lambda'_{\text{лRB}} = \frac{2,3\Delta_{\text{кЗкВ}}}{Z_R l_{\delta R} [2\sin(\pi p'/Z_R)]^2} \lg\left(\frac{2,35\Delta_{\text{кЗкВ}}}{h_{\text{кВ}} + b_{\text{кВ}}}\right) =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 3,6}{18 \cdot 3,1 \cdot [2\sin(\pi 1/18)]^2} \lg\left(\frac{2,35 \cdot 3,6}{1,5 + 3}\right) = 0,3372;$$

$$\lambda'_{\text{лR}} = (\lambda'_{\text{лRЗ}} + \lambda'_{\text{лRB}})/2 = (3,33 + 0,3372)/2 = 1,834;$$

$$\lambda''_{\text{лRЗ}} = \frac{2,3\Delta_{\text{кЗкЗ}}}{Z_R l_{\delta R} [2\sin(\pi p''/Z_R)]^2} \lg\left(\frac{2,35\Delta_{\text{кЗкЗ}}}{h_{\text{кЗ}} + b_{\text{кЗ}}}\right) =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 10,6}{18 \cdot 3,1 \cdot [2\sin(\pi \cdot 2/18)]^2} \lg\left(\frac{2,35 \cdot 10,6}{0,8 + 2,2}\right) = 0,8583;$$

$$\lambda'_{\text{лRB}} = \frac{2,3\Delta_{\text{кЗкВ}}}{Z_R l_{\delta R} [2\sin(\pi p''/Z_R)]^2} \lg\left(\frac{2,35\Delta_{\text{кЗкВ}}}{h_{\text{кВ}} + b_{\text{кВ}}}\right) =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 3,6}{18 \cdot 3,1 \cdot [2\sin(\pi \cdot 2/18)]^2} \lg\left(\frac{2,35 \cdot 3,6}{1,5 + 3}\right) = 0,0869;$$

$$\lambda''_{\text{лR}} = (\lambda''_{\text{лRЗ}} + \lambda''_{\text{лRB}})/2 = (0,85833 + 0,0869)/2 = 0,473.$$

3.3.22. Сумарна провідність розсіювання ротора:

$$\lambda'_{\text{RΣ}} = \lambda_{\text{лR}} + \lambda'_{\text{лR}} + \lambda'_{\text{лRB}} = 3,882 + 0,806 + 1,834 = 6,522;$$

$$\lambda''_{\text{RΣ}} = \lambda_{\text{лR}} + \lambda''_{\text{лR}} + \lambda''_{\text{лRB}} = 3,882 + 2,37 + 0,473 = 6,725.$$

3.3.23. Індуктивний опір розсіювання ротора:

$$(x_2)' = 7,9 f_1 l_{\delta R} \lambda'_{\text{RΣ}} \cdot 10^{-8} = 7,9 \cdot 50 \cdot 3,1 \cdot 6,522 \cdot 10^{-8} = 0,7986 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$(x_2)'' = 7,9 f_1 l_{\delta R} \lambda''_{\text{RΣ}} \cdot 10^{-8} = 7,9 \cdot 50 \cdot 3,1 \cdot 6,725 \cdot 10^{-8} = 0,8235 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

3.3.24. Приведений індуктивний опір ротора:

$$(x_2')' = (x_2)' v'_{\text{пк}} = 0,7986 \cdot 10^{-4} \cdot 1174,66 = 0,0938 \text{ Ом};$$

$$(x_2'')' = (x_2)'' v''_{\text{пк}} = 0,8235 \cdot 10^{-4} \cdot 12033,64 = 0,991 \text{ Ом};$$

$$(x_2'^*)' = \frac{I'_{\text{лн}} (x_2')'}{U_1} = \frac{9,77 \cdot 0,0938}{15,588} = 0,0588;$$

$$(x_2'^*)'' = \frac{I''_{\text{лн}} (x_2'')'}{U_1} = \frac{6,4 \cdot 0,991}{15,588} = 0,4069.$$

3.3.25. Індуктивний опор взаємоіндукції:

$$x'_{\mu} = (U_1 - I'_{\mu} x'_1) / I'_{\mu} = (15,588 - 6,8 \cdot 0,131) / 6,8 = 2,161 \text{ Ом};$$

$$x''_{\mu} = (U_1 - I''_{\mu} x''_1) / I''_{\mu} = (15,588 - 1,917 \cdot 0,813) / 1,917 = 7,318 \text{ Ом};$$

$$x'^*_{\mu} = \frac{I'_{1H} x'_{\mu}}{U_1} = \frac{9,77 \cdot 2,161}{15,588} = 1,354;$$

$$x''^*_{\mu} = \frac{I''_{1H} x''_{\mu}}{U_1} = \frac{6,4 \cdot 7,318}{15,588} = 3.$$

### 3.4. Методика розрахунку робочих характеристик

3.4.1. Коефіцієнти схеми заміщення

$$\rho = R_1 / (x_1 + x_{\mu});$$

$$\tau = x_1 / x_{\mu}.$$

3.4.2. Параметри схеми заміщення:

$$R'_1 = R_1 = 0,258 \text{ Ом}; R''_1 = 1,031 \text{ Ом};$$

$$x'_1 = x_1 (1 + \tau) (1 + \rho R_1 / x_1) \text{ Ом};$$

$$R''_2 = 2R'_{2\Pi} (1 + \tau)^2 (1 + \rho^2) \text{ Ом};$$

$$x''_2 = x'_2 (1 + \tau)^2 (1 + \rho^2) \text{ Ом}.$$

3.4.3. Параметри короткого замикання:

$$R''_2 = R'_1 + R''_2 \text{ Ом}; x_K = x'_1 + x''_2 \text{ Ом};$$

$$z_K = \sqrt{R_K^2 + x_K^2} \text{ Ом}.$$

3.4.4. Додаткові утрати при номінальному навантаженні

$$P_d = 0,005 P_2 \cdot 10^3 / \eta'_H$$

3.4.5. Механічна потужність двигуна

$$P_{2\text{мех}} = P_2 \cdot 10^3 + P_{\text{мех}} + P_d \text{ Вт}.$$

3.4.6. Еквівалентний опір навантаження

$$R_H = m U_1^2 / (2P_{2\text{мме}}) - R_K + \sqrt{\left[ m U_1^2 / (2P_{2\text{мме}}) - R_K \right]^2 - z_K^2} \text{ Ом}.$$

## 3.4.7. Еквівалентний опір схеми заміщення

$$z_H = \sqrt{(R_H + R_K)^2 + x_K^2} \text{ Ом.}$$

3.4.8. Перевірка значень  $R_H$ ,  $z_H$ 

$$P_{2\text{мех}} = mU_1^2 R_H / z_H^2 \text{ Вт.}$$

## 3.4.9. Номінальне ковзання:

$$s_H = 1 / (1 + R_H / R_2'');$$

$$s_{H\%} = 100 s_H.$$

## 3.4.10. Реактивна складова струму статора при синхронному обертанні

$$I_{op} = U_1 / [x_\mu (1 + \tau)(1 + \rho^2)] \text{ А.}$$

## 3.4.11. Утрати обмотки статора при синхронному обертанні

$$P_{ел.с.} = mI_{op}^2 R_1' (1 + \rho^2) \text{ Вт.}$$

## 3.4.12. Активна складова струму при синхронному обертанні

$$I_{oa} = (P_{ел.с.} + P_{с\Sigma} + P_{мех}) / (mU_1) \text{ А.}$$

## 3.4.13. Струм ротора

$$I_2'' = U_1 / z_H \text{ А.}$$

## 3.4.14. Активна складова струму статора

$$I_{1a} = I_{oa} + I_2'' [(R_H + R_K)(1 - \rho^2) + 2\rho x_K] / [z_H (1 + \rho^2)] \text{ А.}$$

## 3.4.15. Реактивна складова струму статора

$$I_{1p} = I_{op} + I_2'' [x_K (1 - \rho^2) - 2\rho(R_H + R_K)] / [z_H (1 + \rho^2)] \text{ А.}$$

## 3.4.16. Фазний струм статора

$$I_{1H} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} \text{ А.}$$

## 3.4.17. Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = I_{1a} / I_{1H}.$$

## 3.4.18. Електричні утрати в обмотках статора і ротора у номінальному режимі:

$$P_{ел1H} = mI_{1H}^2 R_1 \text{ Вт;}$$

$$P_{ел2H} = mI_2''^2 R_2'' \text{ Вт;}$$

## 3.4.19. Сумарні утрати у електродвигуні

$$P_{\Sigma H} = P_{ел1H} + P_{ел2H} + P_{с\Sigma} + P_{мех} + P_{д} \text{ Вт.}$$

## 3.4.20. Споживаєма потужність

$$P_1 = P_{2H} \cdot 10^3 + P_{\Sigma H} \text{ Вт.}$$

## 3.4.21. Номінальне значення ККД

$$\eta_H = 1 - P_{\Sigma H} / P_1.$$

## 3.4.22. Перевірка споживаємої і номінальної потужності:

$$P_1 = m I_{1a} U_1 \text{ Вт.}$$

$$P_2 = m I_{1H} U_1 \cos \phi_H \eta_H \text{ Вт.}$$

## 3.4.23. Номінальний момент двигуна

$$M_H = p P_H / [\omega_1 (1 - s_H)] \text{ Дж}$$

де  $\omega_1 = 2\pi f_1 = 314 \text{ 1/сек.}$  – кутова частота мережі.

3.4.24. Пусковий момент двигуна (у зв'язку з тим, що висота стрижня менше 30 мм витискання струму та насичення не враховується)

$$M_{\Pi} = \frac{pm U_1^2}{\omega_1} \left\{ \frac{R'_2}{[R_1 + (1 + \tau) R'_2]^2 + [x_1 + (1 + \tau) x'_2]^2} \right\} \text{ Дж.}$$

де  $R'_2$  - активний опір ротора,

$$R'_2 = 2R'_{2\Pi} \text{ Ом.}$$

## 3.4.25. Кратність пускового моменту

$$k_{\Pi} = M_{\Pi} / M_H.$$

## 3.4.26. Пусковий струм (без урахування витискання та насичення)

$$I_{\Pi} = U_1 / z_K \text{ А.}$$

## 3.4.27. Кратність пускового струму

$$k_I = I_{\Pi} / I_{1H}.$$

3.4.28. Опір схеми заміщення при ковзанні  $s = \infty$ 

$$z_{\infty} = \sqrt{R_1^2 + x_K^2} \text{ Ом.}$$

## 3.4.29. Кратність максимального моменту

$$k_M = M_M / M_H = m U_1^2 (1 - s_H) / [2(z_\infty + R_1) P_2 10^3].$$

3.4.30. Ковзання при максимальному моменті

$$s_M = R_2'' / z_\infty.$$

Розрахунки за стандартною методикою [12] п.п. 3.4.1 – 3.4.30 виконано на ЕОМ за допомогою математичного прикладного пакету MCAD 15. Результати розрахунків подано у табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Технічна характеристика

Варіант	Показники					
	$P'_H / P''_H,$ кВт $\frac{n'_1 / n''_1}{\text{об/хв}}$	$\eta' / \eta'',$ в.о.	$\cos \varphi' /$ $\cos \varphi'',$ в.о.	$k'_H /$ $k''_H,$ в.о.	$k'_I /$ $k''_I,$ в.о.	$k'_M /$ $k''_M,$ в.о.
Технічне завдання	0,14/0,07 3000/1500	0,72/0,63	0,72/0,7	$\geq 0,8$	$\leq 6$	$\geq 2$
Розрахунок	0,14/0,07 3000/1500	0,69/0,6	0,78/0,72	1,28/0, 9	5,4/4,3	2,28/1,9

На основі отриманих результатів можна висловити, що спроектований двигун відповідає вимогам технічного завдання.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Удосконалення обладнання морської техніки можливо на основі використання спеціальних асинхронних двигунів з підвищеною конструктивною пристосованістю до конкретних механізмів.

Для можливості уніфікації та підвищення технічного рівня обладнання комплексної обробки повітря у агрегатах нагріву та очищення доцільно використання торцевих асинхронних двигунів з закріпленням робочого колеса вентилятора на зовнішньому торці дискового ротора. Для забезпечення можливості його використання у основному і аварійному режимах виконано розробку спеціального двохшвидкісного двигуна з полюсоперемикаємою обмоткою у співвідношенні  $2p_1/2p_2 = 1/2$ .

При проектуванні двигуна для привода малогабаритного електровентилятора необхідно віддано перевагу схемі торцевого асинхронного двигуна з одноопорним встановленням ротора, яка найбільш повно задовольняє вимогам мінімальних габаритних розмірів і підвищеної надійності. Вказана схема відрізняється високою компактністю, малими витратами конструкційних матеріалів при достатній жорсткості обумовленої значною вантажопідйомністю підшипника. Для покращення масогабаритних показників ТАД та підвищення надійності і віброударостійкості, використано конусно-циліндричний магнітопровід зі зменшеною масою та моментом інерції ротора. Використання одноопорної схеми для приводу вентилятора забезпечує кріплення робочого колеса безпосередньо до ротора і максимальне зниження габаритних розмірів електровентилятора. При цьому додатково поліпшується охолодження за рахунок тепло відводу з ротора на лопатки. Для захисту обмотки статора від зовнішнього середовища використовується капсулювання статора.

На основі отриманих результатів можна висловити, що спроектований двигун відповідає вимогам технічного завдання, та за своїми технічними показниками кращий ніж двигун циліндричного виконання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боровиков П.А. Обживание человеком морских глубин. Системы жизнеобеспечения. Проблемы исследования и освоения мирового океана. – Л.: Судостроение, 1979. – 302 с.
2. Кенни Д.Б. Техника освоения морских глубин. – Л.: Судостроение, 1977. - 267 с.
3. Вишняков В.А., Меренов Н.В. Глубоководная водолазная техника. – Л.: Судостроение, 1983. – 276 с.
4. Хаукс Герхард. Подводная техника. – Л.: Судостроение, 1980 – 192 с.
5. Яздовский В.И. Искусственная биосфера. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
6. Дорофеев Ю.П., Очева И.П. Основные направления развития зарубежных технических средств разведки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. – Судостроение, 1975, №10.
7. Фишичев А.И., Васильев Ю.В. Аварийно-спасательные и судоподъемные средства. – Л.: Судостроение, 1979. – 233 с.
8. Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований. Справочник под ред. д.т.н. Ястребова В.С. – Л.: Судостроение, 1981. – 297 с.
9. Бугаенко Б.А. Динамика судовых спускоподъемных операций. – Київ: Наукова думка, 2004. – 320 с.
10. Иванов - Смоленский А.В. Электрические машины - М.: Энергия, 1980 с. 620.
11. Аптекарь М.В., Фонберштейн И.М. Судовые вентиляторы (Особенности проектирования и устройства).– Л.:Судостроение, 1971.– 484 с.



12. Сергеев П. С. и др. Проектирование электрических машин. Изд. 3-е. – Москва: Энергия, 1970. – 632 с.
13. Ставинский А.А., Корчагин Ю.В. Перспективные конструкции малогабаритных электровентиляторов для судового кондиционирования и вентиляции // Труды НКИ. – Николаев: НКИ. – 1978. – Вып. 139. – С. 125 – 128.
14. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. – Л.: Энергия, 1974. – 200 с.
15. Ставинский А.А. "Асинхронные двигатели с внутренними короткозамкнутыми кольцами и секционированными магнитопроводами ротора" - Техническая электродинамика, 1993, №1 с. 53-57.
16. Новиков Ю.Д., Лучук В.Ф. "Влияние эксцентриситета ротора на величину осевых магнитных потоков асинхронных двигателей " - Техническая электродинамика, 1984, №4 с. 60-63.
17. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: Учебн. пособие для Вузов/ О.Д. Гольдберг. О.Б. Буль, И.С. Свириденко и др. – М.: Высшая школа, 2001. – 512 с.
18. Проведение поисковых исследований по созданию и разработке экспериментального образца торцевого асинхронного двигателя для привода электровентилятора судового модульного кондиционера: Отчет о НИР/ВНТИ – Центр. У09029. – 1986. – 63 с.
19. Войтех А.А., Киричек Г.М., Лир Э.В. Асинхронные двигатели с регулированием скорости. – Київ: Техніка, 1973 – 172 с.
20. Справочник по охране труда на промышленном предприятии / К.Н. Ткачук, Д.Ф. Иванчук, Р.В. Сабарно, А.Г. Степанов. – К.: Техника, 1991. – 285 с.